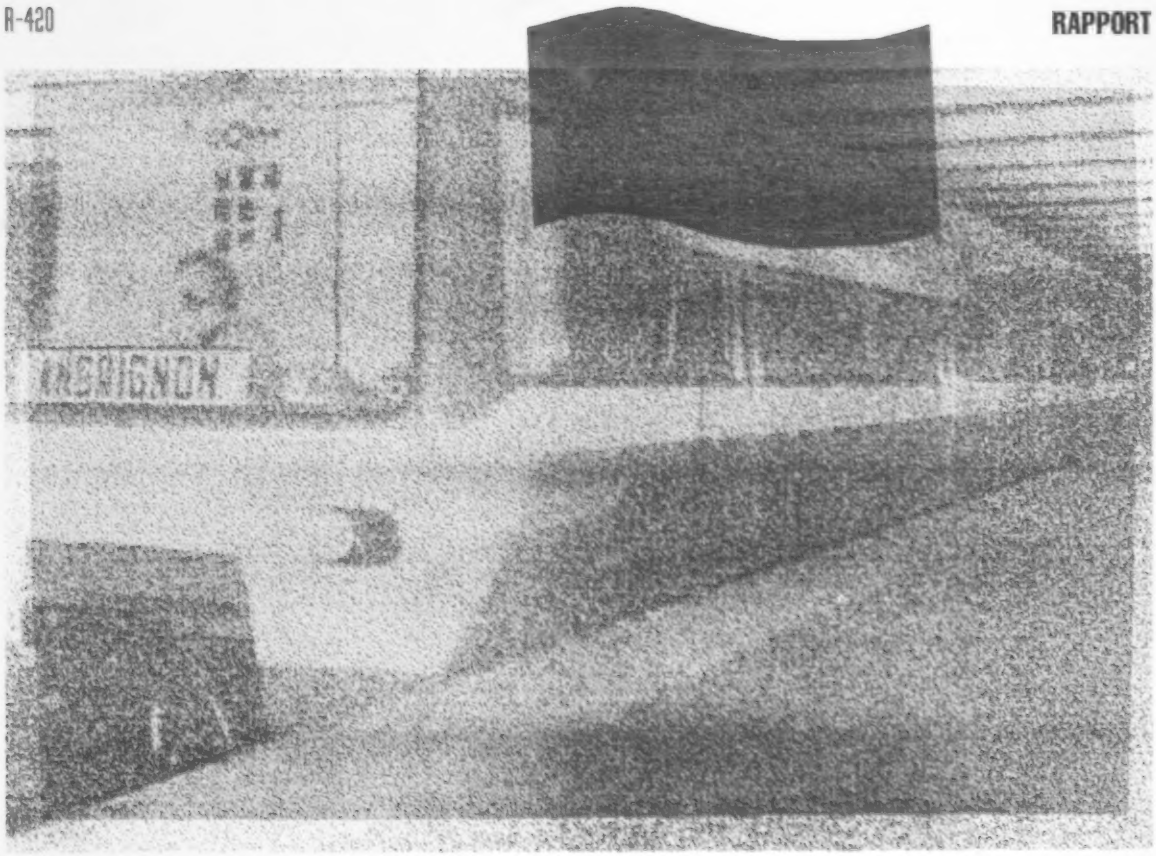
Évaluation de l'exposition aux vibrations globales du corps des opérateurs du métro de Montréal et étude du comportement dynamique des motrices et de leur système de suspension

ÉTUDES ET RECHERCHES

Paul-Émile Boileau
Jérôme Boutin
Subhash Rakheja
Harry Politis

R-420

RAPPORT



irsst

Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

NOS RECHERCHES *travaillent* pour vous !

MISSION

- Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes.
- Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.
- Assurer la diffusion des connaissances, jouer un rôle de référence scientifique et d'expert.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission de la santé et de la sécurité du travail.

POUR EN SAVOIR PLUS...

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement.
www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CSST.
Abonnement : 1-877-221-7046

IRSST - Direction des communications
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : (514) 288-1551
Télécopieur : (514) 288-7636
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail, mai 2005

Évaluation de l'exposition aux vibrations globales du corps des opérateurs du métro de Montréal et étude du comportement dynamique des motrices et de leur système de suspension

Paul-Émile Boileau et Jérôme Boutin
Sécurité-ingénierie, IRSST

Subhash Rakheja et Harry Politis
Département de génie mécanique et industriel, Université Concordia

ÉTUDES ET RECHERCHES

RAPPORT

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca

Cette publication est disponible
en version PDF
sur le site Web de l'IRSST.

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.

CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSST

Les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

105-06243/

SOMMAIRE

Les opérateurs du métro de Montréal se plaignent depuis plusieurs années d'inconfort associé à l'exiguïté des loges existantes et des vibrations qui leur sont transmises par les strapontins qui leur servent de surface de sustentation. Une étude réalisée parallèlement à celle-ci a permis d'identifier les problèmes de santé et de sécurité des opérateurs du métro, d'évaluer les contraintes ergonomiques liées à leur travail et de définir les exigences de conception des loges et d'aménagement du poste de travail qui permettraient d'améliorer la situation. La présente étude porte sur la caractérisation des niveaux d'exposition aux vibrations globales du corps auxquels sont soumis les opérateurs du métro dans l'exercice de leur fonction et sur l'identification du comportement dynamique des motrices MR-63 et MR-73 utilisées par le métro de Montréal. Celui-ci se distingue de la majorité des autres systèmes de métro par l'utilisation d'un mode de traction sur pneumatiques et roulement sur une surface de béton dont le niveau de défaut d'uni a été mesuré comme étant très faible.

Les résultats de l'étude ont démontré que les niveaux d'exposition aux vibrations globales du corps sont les plus importants dans les motrices MR-63 qui font apparaître une composante en fréquence d'intensité importante à proximité de 6 Hz en plus de la composante fondamentale du mode de vibration verticale du caisson à 2,1 Hz. Les niveaux de vibrations sont accentués davantage lorsque la motrice est munie de pneus présentant une ovalisation qui excède les tolérances établies. Quant aux motrices MR-73 qui présentent des niveaux de vibrations sensiblement plus faibles que les MR-63, la fréquence fondamentale du mode de vibrations verticales du caisson apparaît à 2,4 Hz et la composante à 6 Hz, bien que présente, est d'intensité beaucoup plus faible et apparaît de façon moins évidente que pour les motrices MR-63. Pour les deux types de motrice, la composante à 6 Hz est associée au mode de vibration verticale du bogie, pour lequel l'intensité des vibrations est accentuée dès que la vitesse de déplacement des motrices excède 60 km/h, ce qui correspond à la fréquence de sollicitation vibratoire du bogie à 6 Hz. En terme d'exposition vibratoire, les niveaux se situeraient dans la « zone de précaution santé » définie dans la norme ISO 2631-1 :1997 pour les opérateurs des motrices MR-63 et à proximité de cette zone pour ceux des motrices MR-73; ceci en tenant compte de la durée d'exposition quotidienne moyenne associée à la conduite du métro.

Pour les deux types de motrices, les niveaux d'exposition aux vibrations sont apparus comme étant plus élevés sur la ligne 4 qui comporte des distances de parcours plus longues entre les stations et une vitesse soutenue à plus haute vitesse pendant une plus longue période de temps que sur les autres lignes. Comparativement, les niveaux sont apparus comme étant les plus faibles sur la ligne 5 et se situent entre ceux de la ligne 5 et de la ligne 4 pour les lignes 1 et 2. La période d'affluence, la position de la motrice en tête ou en queue de train, le degré d'usure des pneus et le niveau de maintenance des motrices se sont avérés avoir peu d'effet sur les niveaux vibratoires mesurés. Par ailleurs, la vitesse, les caractéristiques d'ovalisation des pneus et le parcours ont démontré qu'ils avaient une influence importante sur les niveaux d'exposition vibratoires transmis dans la loge des deux types de motrices.

L'efficacité des strapontins utilisés dans les deux types de motrices est apparue comme étant nulle pour atténuer les vibrations transmises aux opérateurs. Pour l'ensemble des conditions considérées, le facteur SEAT des strapontins a été mesuré comme étant unitaire. Par ailleurs, la suspension, constituée de deux ressorts hélicoïdaux et d'une barre de torsion entre le bogie et le

caisson des motrices, s'est avérée efficace pour atténuer les vibrations au-delà de 3,5 Hz mais le degré d'atténuation fournie ne s'est pas révélé comme étant suffisant dans certains cas pour réduire de façon importante la composante apparaissant à 6 Hz. Parmi les solutions proposées pour réduire l'exposition aux vibrations globales du corps pour les opérateurs des deux types de motrices, figure l'incorporation d'un siège à suspension dont la fréquence naturelle serait suffisamment basse (inférieure à 1,4 Hz) pour permettre non seulement d'atténuer la composante en fréquence à 6 Hz, mais aussi la composante à 2,1 Hz et à 2,4 Hz pour les MR-63 et MR-73, respectivement. Aussi, l'incorporation d'amortisseurs au niveau de la suspension entre le bogie et le caisson permettrait de réduire considérablement l'intensité des modes de vibrations verticales et de roulis du caisson, améliorant du coup le confort des opérateurs.

L'étude a permis de définir les caractéristiques spectrales des vibrations verticales associées aux deux types de motrice MR-63 et MR-73 sous forme de classes spectrales applicables à des conditions moyennes d'opération sur l'ensemble des lignes de métro et aussi à des conditions plus sévères, permettant de définir des caractéristiques spectrales se rapprochant davantage de celles rencontrées pour certaines interstations présentant des niveaux plus élevés. Ces classes spectrales démontrent des différences de comportement dynamique évidentes entre les motrices MR-63 et MR-73 pour le mode de vibrations verticales. La définition de ces classes spectrales permettra éventuellement de reproduire en laboratoire sur simulateur de vibrations, les caractéristiques vibratoires propres à chaque type de motrice, ouvrant ainsi la voie à l'identification des sièges les mieux adaptés à cet environnement vibratoire.

REMERCIEMENTS

Cette étude n'aurait pas été possible sans la participation active de plusieurs intervenants oeuvrant au sein de la Société de transport de Montréal (STM). Que ce soit au niveau des représentants de l'employeur, des représentants syndicaux du local SCFP 1983, qui ont participé au Comité de suivi du projet, tous les différents paliers de l'entreprise ont été mis à contribution pour la réalisation de cette étude. Ceux-ci ont notamment fait intervenir les opérateurs du métro de Montréal, les services d'entretien du matériel roulant, les répartiteurs, les services d'ingénierie et de planification, le Centre de contrôle et d'exploitation des trains pour faire en sorte que les mesures soient réalisées en assurant un service normal pour les usagers du métro. Des remerciements vont également aux chercheurs et professionnels des équipes internes et externes de l'IRSST qui ont participé au Comité de suivi, dont notamment des représentants des universités Concordia et Laval et des équipes Sécurité-ergonomie et Sécurité-ingénierie de l'IRSST. Merci également à l'APSAM qui a appuyé la réalisation de cette étude et participé au Comité de suivi.

TABLE DES MATIÈRES

Page

1. INTRODUCTION 1

2. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE 3

3. PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL 5

3.1 Description des motrices 5
3.2 Description des variables 6
3.3 Déroulement des essais 7
3.4 Métrologie des vibrations 8
3.5 Caractéristiques des sièges 12
3.6 Ovalisation des pneus 13
3.7 Profil de la surface de roulement 13

4. RÉSULTATS DES MESURES DE L'EXPOSITION AUX VIBRATIONS 15

4.1 Caractérisation de l'exposition vibratoire en direction verticale 15
4.1.1 Caractéristiques spectrales des vibrations verticales au siège 23
4.2 Caractérisation de l'exposition vibratoire dans les directions transversales et au dossier 24
4.3 Évaluation de la dose d'exposition vibratoire pour les opérateurs du métro de Montréal 26
4.4 Influence de la vitesse sur les niveaux d'exposition vibratoire 27
4.5 Évaluation de l'efficacité des strapontins 31

5. ÉVALUATION DU COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES MOTRICES ET DE LA SUSPENSION 33

5.1 Modes vibratoires en direction verticale 33
5.2 Modes vibratoires de roulis 34
5.3 Modes vibratoires des accélérations latérales 37
5.4 Mode vibratoire de tangage du bogie 37
5.5 Sommaire des modes vibratoires 37
5.6 Comportement dynamique de la suspension 40

6. DÉFINITION DES CLASSES SPECTRALES DES VIBRATIONS 43

7. DÉFINITION DES EXIGENCES DE CONCEPTION : SIÈGE ET SUSPENSION 49

8. CONCLUSION 51

9. BIBLIOGRAPHIE 53

LISTE DES TABLEAUX

Page

TABLEAU 1 : Caractéristiques des motrices MR-63 et MR-73 6
TABLEAU 2 : Motrices sortant d'un entretien complet – Moyennes des accélérations efficaces pondérées mesurées sur chaque ligne selon chaque axe et point de mesure (combinant périodes de pointe et hors-pointe et position tête et queue de train) 16
TABLEAU 3 : Motrices dues pour un entretien complet – Moyennes des accélérations efficaces pondérées mesurées sur chaque ligne selon chaque axe et point de mesure (combinant périodes de pointe et hors-pointe et position tête et queue de train) 17
TABLEAU 4 : Accélération efficace pondérée mesurée pour chaque interstation sur la ligne 1 pour chaque condition d'essai 19
TABLEAU 5 : Accélération efficace pondérée mesurée pour chaque interstation sur la ligne 2 pour chaque condition d'essai 20
TABLEAU 6 : Accélération efficace pondérée mesurée pour chaque interstation sur la ligne 4 pour chaque condition d'essai 21
TABLEAU 7 : Accélération efficace pondérée mesurée pour chaque interstation sur la ligne 5 pour chaque condition d'essai 22
TABLEAU 8 : Accélération efficace pondérée moyenne établie en direction verticale pour chaque ligne de métro pour les types de motrices indiquées 23
TABLEAU 9 : Accélération efficace pondérée moyenne établie dans les directions transversales pour les types de motrices indiquées 25
TABLEAU 10 : Caractérisation des valeurs d'accélération efficace équivalente 8 heures pour les valeurs a_w indiquées (doses vibratoires calculées pour une durée d'exposition quotidienne de 5,3 heures) 27
TABLEAU 11 : Fréquences des modes vibratoires des composantes des motrices MR-63 et MR-73 37
TABLEAU 12 : Accélération efficace pondérée et non pondérée correspondant aux spectres définissant les classes spectrales des vibrations verticales des motrices. 46

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 1 : Représentation du bogie et des éléments de suspension 5
Figure 2a : Localisation des points de mesure sur le strapontin, le caisson et le bogie 10
Figure 2b : Localisation des points de mesure des vibrations sur l'essieu 11
Figure 3 : Représentation des strapontins utilisés dans les motrices MR-63 et MR-73 12
Figure 4 : Spectres moyens en bandes de fréquences de tiers d'octave des accélérations pondérées mesurées sur le siège en direction verticale pour les différentes motrices et lignes du métro 24
Figure 5 : Spectres en fréquences des vibrations transversales mesurées sur le siège d'une motrice MR-63 26
Figure 6 : Influence de la vitesse de déplacement des motrices sur les niveaux d'accélération efficace pondérée pour différentes motrices opérant sur les interstations indiquées 28
Figure 7 : Influence de la vitesse sur les accélérations efficaces pondérées pour différentes motrices opérant sur une même interstation 30
Figure 8 : Spectres en fréquence en bandes de tiers d'octave des vibrations verticales au siège de différentes motrices opérant sur la même interstation dans des conditions identiques 31
Figure 9 : Courbes de transmissibilité vibratoire des strapontins utilisés dans différents types de motrice pour des conditions d'opération identiques 32
Figure 10 : Spectres en fréquence moyens de la DSP mesurés en direction verticale sur le caisson, le bogie et l'essieu pour : (a) les motrices MR-63 et (b) les motrices MR-73 (Ligne 4) 35
Figure 11 : Spectres en fréquence moyens de la DSP mesurés pour le roulis sur le caisson, le bogie et l'essieu pour : (a) les motrices MR-63 et (b) les motrices MR-73 (Ligne 4) 36
Figure 12 : Spectres en fréquence moyens de la DSP mesurés en direction latérale sur le caisson, le bogie et l'essieu pour : (a) les motrices MR-63 et (b) les motrices MR-73 (Ligne 4) 38
Figure 13 : Spectres en fréquence moyens de la DSP mesurés pour le tangage du bogie pour: (a) les motrices MR-63 et (b) les motrices MR-73(Ligne 4) 39
Figure 14 : Courbes de transmissibilité vibratoire bogie-caisson pour une motrice MR-63: (a) les vibrations verticales ; (b) les vibrations angulaires de roulis (Ligne 4) 41
Figure 15 : Courbes de transmissibilité vibratoire bogie-caisson pour une motrice MR-73: (a) les vibrations verticales ; (b) les vibrations angulaires de roulis (Ligne 4) 42
Figure 16 : Spectres en fréquence de la DSP mesurés en direction verticale sur les différentes lignes de métro pour les motrices MR-63: (a) spectres moyens (b) enveloppe des valeurs maximales 44
Figure 17: Spectres en fréquence de la DSP mesurés en direction verticale sur les différentes lignes de métro pour les motrices MR-73: (a) spectres moyens (b) enveloppe des valeurs maximales 45
Figure 18 : Spectres en fréquence de la DSP représentant les classes spectrales en direction verticale pour: (a) les motrices MR-63 (b) les motrices MR-73 47
Figure 19 : Spectres en fréquence de la DSP représentant les classes spectrales de roulis pour: (a) les motrices MR-63 (b) les motrices MR-73 48

1. INTRODUCTION

Pour les conducteurs de véhicules, il est maintenant généralement admis que la posture assise prolongée et l'exposition à des vibrations et à des chocs mécaniques constituent des facteurs de risque dans l'étiologie d'affections musculo-squelettiques **[1,2]**. Sur le plan de la prévention technique, il ne fait plus de doute que le choix d'un siège ou la conception d'un poste de conduite doit non seulement tenir compte des éléments favorisant une exposition vibratoire minimale, mais aussi des exigences liées aux tâches à accomplir, tout en considérant les variations dans les caractéristiques anthropométriques des conducteurs **[3, 4]**.

Le métro de Montréal existe depuis plus de 35 ans et compte aujourd'hui quelques 759 voitures réparties sur 4 lignes. Une population de près de 300 opérateurs de métro veillent quotidiennement au fonctionnement de ces rames de métro qui s'effectue dans des couloirs souterrains à l'aide de deux types de motrices, soit les MR-63 (336 voitures) et les MR-73 (423 voitures). Au fil des années, le déplacement de certaines commandes liées à la conduite a modifié radicalement les exigences du travail en favorisant une position assise. Compte tenu de l'exiguïté des loges, seul un siège (i.e. strapontin) comportant un coussin et un dossier de faibles dimensions est actuellement utilisé, offrant peu ou pas d'ajustements pour adapter le poste de conduite à des individus de tailles différentes. Les nombreuses plaintes formulées par les opérateurs de métro au cours des années en rapport avec l'exiguïté des lieux et l'inconfort ressenti sur les sièges laissent supposer que les contraintes ergonomiques actuelles et les vibrations pourraient constituer des risques d'atteinte à la santé. Bien qu'aucune donnée épidémiologique n'ait encore été rendue disponible et qu'aucune mesure d'envergure d'exposition aux vibrations n'avait encore été réalisée pour les opérateurs du métro de Montréal, il était permis de croire que l'aménagement des loges actuelles et les vibrations pouvaient être à l'origine de certains des malaises/incidents rapportés. Il y avait donc un besoin évident de définir les contraintes ergonomiques et vibratoires actuellement subies par les opérateurs du métro de Montréal, d'élaborer des critères de conception souhaitables pour la suspension et les sièges et d'identifier les moyens qui permettraient de satisfaire aux critères ainsi définis.

En ce qui concerne les systèmes de métro, peu d'études ont actuellement porté sur l'évaluation de l'exposition aux vibrations globales du corps des passagers ou du personnel prenant place à bord des voitures et motrices du métro. On reconnaît généralement que l'environnement vibratoire de ces véhicules est complexe, étant lié aux interactions entre les roues et le rail et au comportement dynamique combiné des essieux, des bogies et du chassis des voitures. Les accélérations et décélérations constantes liées au freinage et les interactions avec les systèmes de guidage latéraux sont susceptibles d'engendrer des mouvements de translation et de rotation non négligeables. Une étude d'envergure **[5,6]** réalisée dans le métro de New York à la fin des années 1980 a permis d'établir que les opérateurs étaient exposés à des niveaux supérieurs à ceux recommandés dans l'ancienne version de la norme ISO 2631 (i.e. « limite à la capacité réduite par fatigue »), pour une durée d'exposition quotidienne de 8 heures. De plus, un questionnaire auto-administré **[5]** chez une population de 492 opérateurs de métro et de 92 travailleurs servant de groupe témoin démontrait un risque accru de douleurs cervicales et lombaires (sciatiques) chez les opérateurs de métro (probabilité presque quatre fois plus élevée que chez le groupe témoin), lesquelles étaient attribuées à l'exposition aux vibrations globales du corps et à des conditions ergonomiques défavorables. Les mesures de vibration **[6]** démontraient une

prédominance des vibrations sur les sièges selon les axes vertical et latéral, avec pics de concentration de l'énergie vibratoire à 2,5 et à 12,5 Hz selon l'axe vertical et à proximité de 1,5 et 16 Hz selon l'axe latéral. D'autres données mettaient aussi en évidence des différences des niveaux d'exposition vibratoire dans différentes motrices ainsi que des variations liées à l'entretien et à la vitesse **[7, 8]**. Par ailleurs, on ne relevait aucun lien évident entre les niveaux d'exposition vibratoire et la charge transportée et on notait une influence de la qualité du rail et de l'expérience de conduite de l'opérateur sur le niveau d'exposition.

Contrairement au métro de New York qui utilise des roues et des rails de métal, le métro de Montréal a la particularité d'utiliser des pneumatiques et une surface de roulement en béton. Les caractéristiques des vibrations provenant des interactions entre les roues et la surface de roulement sont donc susceptibles d'être bien différentes de celles du métro de New York, particulièrement en direction latérale en raison des différences introduites au niveau du système de guidage. Cependant, aucune donnée vibratoire d'envergure n'a été publiée pour les systèmes de transport guidé impliquant l'utilisation de pneumatiques. Par ailleurs, les caractéristiques de conception des bogies, du châssis et de la suspension semblent s'apparenter à celles rencontrées dans plusieurs types de systèmes ferroviaires, bien que la suspension des voitures du métro de Montréal n'utilise que des ressorts hélicoïdaux, contrairement à une combinaison ressorts-amortisseurs dans le métro de New York.

Au chapitre de la prévention technique des vibrations globales du corps dans les véhicules, il ne fait plus de doute que l'utilisation de sièges et de systèmes de suspension bien adaptés à l'environnement vibratoire propre aux véhicules constitue un moyen efficace pour réduire les risques. À l'opposé, des sièges ou systèmes de suspension mal adaptés pourraient avoir l'effet contraire en amplifiant les niveaux d'exposition aux vibrations. Une étude comparative de trois sièges non suspendus (siège original et deux nouveaux prototypes à configuration plus complexe) effectuée dans le métro de New York **[9]**, a démontré que les sièges à configuration plus complexe, bien qu'apparaissant mieux adaptés dans un environnement statique, procuraient une valeur totale de vibration plus élevée que le siège original, en raison de l'accentuation de certains modes vibratoires par ces sièges lorsque soumis aux vibrations des motrices du métro. Par ailleurs, une autre étude **[10]** réalisée par les mêmes auteurs démontrait qu'en remplacant la suspension mécanique des voitures de métro par une suspension pneumatique, la valeur totale de vibration au poste d'opérateur pouvait être réduite de 31 %. Ces résultats servent à illustrer l'importance de bien connaître les caractéristiques de l'environnement vibratoire typique des véhicules dans le but d'identifier les sièges et systèmes de suspension qui sont susceptibles de procurer une atténuation optimale des vibrations dans un tel environnement. Bien que les caractéristiques de l'environnement vibratoire sous forme de classes spectrales aient été définies pour plusieurs catégories de véhicules (e.g. tracteurs agricoles, engins de terrassement, chariots élévateurs), il n'en est pas ainsi pour les systèmes de transport guidé. C'est pourquoi il est proposé dans le cadre de cette étude d'inclure un volet visant à définir des classes spectrales pour caractériser l'environnement vibratoire des motrices du métro de Montréal.

Une étude réalisée parallèlement à celle-ci a permis d'identifier les problèmes de santé et de sécurité des opérateurs du métro, d'évaluer les contraintes ergonomiques liées à leur travail et de définir les exigences de conception des loges et d'aménagement du poste de travail qui permettraient d'améliorer la situation. Ces résultats sont présentés dans un rapport distinct **[11]**.

2. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Le métro de Montréal compte parmi les quelques systèmes au monde à utiliser des pneumatiques comme éléments de traction, contrairement à des roues d'acier dont l'utilisation est plus communément répandue. De ce fait, les caractéristiques vibratoires de ce type de véhicule sont moins bien documentées que celles de systèmes de métro pour lesquels les interactions entre les roues et le rail sont de type métal sur métal, bien que le nombre d'études publiées sur le sujet reste quand même très limité. De plus, les nombreux facteurs opérationnels et de conception susceptibles d'influencer les vibrations transmises dans la loge du métro font en sorte qu'il est difficile de transposer les résultats de mesures effectuées dans un système de métro à celui d'un autre. Ainsi, cette étude vise à établir les caractéristiques d'exposition vibratoire des opérateurs de métro sur les strapontins dans les loges actuelles du métro de Montréal, et aussi de définir les caractéristiques spectrales de l'environnement vibratoire propre aux motrices utilisées dans des conditions d'opération typique. L'influence de certains facteurs opérationnels (vitesse, charge transportée, maintenance, usure des pneus, parcours) sur les caractéristiques vibratoires est évaluée de même que la performance d'atténuation des vibrations par le strapontin et le système de suspension des motrices.

Plus spécifiquement, les objectifs de cette étude consistent à :

i. Déterminer les niveaux d'exposition vibratoire auxquels les opérateurs de métro sont soumis dans le cadre de leur travail pour juger de leur importance par rapport à des guides reconnus permettant de relier les doses vibratoires aux effets escomptés sur la santé;
ii. Évaluer l'importance des différents facteurs opérationnels sur les niveaux d'exposition vibratoire;
iii. Évaluer l'efficacité des strapontins actuels pour atténuer les vibrations transmises aux opérateurs;
iv. Définir des classes spectrales représentant les spectres en fréquence des vibrations agissant au plancher des motrices dans des conditions typiques d'opération;
v. Identifier les caractéristiques désirables de raideur et d'amortissement des sièges qui permettraient une atténuation optimale des vibrations dont les caractéristiques sont décrites par les classes spectrales définies;
vi. Évaluer le comportement dynamique du système de suspension actuel des motrices et son efficacité pour atténuer les vibrations transmises dans les loges des motrices;
vii. Identifier des caractéristiques désirables de la suspension qui permettraient une atténuation optimale des vibrations transmises dans la loge des motrices.

En raison de la nécessité de réaliser les mesures dans des conditions d'opération normale du métro (en service), l'analyse des interactions possibles entre les différentes variables indépendantes susceptibles d'influencer les niveaux d'exposition vibratoire n'est pas incluse dans cette étude. Tout au plus, l'approche expérimentale se limite à faire varier une seule variable à la fois, sans qu'un contrôle direct ne puisse être exercé sur elles pour permettre l'opération normale du métro.

3. PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

L'étude consiste à évaluer les vibrations en répartissant le travail à deux niveaux : i) mesures dans la loge de l'opérateur du métro, plus spécifiquement sur le strapontin pour mesurer l'exposition aux vibrations globales du corps, et au plancher pour caractériser l'environnement vibratoire dans la loge de la motrice; ii) mesures sur le bogie et les essieux pour permettre l'évaluation du comportement de la suspension et éventuellement servir de base à l'élaboration d'un modèle pour simuler le comportement vibratoire du véhicule. Tout en tenant compte des différentes directions dans lesquelles les vibrations agissent (mouvements verticaux (z), latéraux (y), longitudinaux (x), de roulis ($\ddot{\phi}$), de tangage ($\ddot{\theta}$), de lacet ($\ddot{\psi}$)) et des nombreux points de mesure, une vingtaine de canaux de mesure ont dû être contrôlés. Jumelé au besoin de caractériser les vibrations sur deux types de motrice (MR-63 et MR-73) opérant sur les quatre différentes lignes du métro de Montréal avec variations de la vitesse, de la charge transportée, de la rugosité de la surface de roulement, etc., le protocole expérimental a nécessité un nombre important d'essais qui ont été réalisés sur une période de quatre semaines alors que le métro opérait en service normal.

3.1 Description des motrices

Le métro de Montréal utilise deux types de motrice : les MR-63, fabriquées par la Canadian Vickers, mises en service en 1966, et rénovées en 1983 et opérant exclusivement sur la ligne 1 (verte); les MR-73, fabriquées par Bombardier et mises en service en 1976 et opérant sur les autres lignes 2 (orange), 4 (jaune) et 5 (bleue). Le caisson de chacune des motrices est supporté sur deux bogies positionnés à l'avant et à l'arrière. La suspension intégrée entre les bogies et le caisson comporte deux ressorts hélicoïdaux liés à une barre de torsion qui augmente la raideur. La figure 1 illustre la configuration de la suspension d'un bogie.

Les deux modèles de motrice ont des caractéristiques de masse et de dimensions similaires, mais un système de traction qui diffère. Les essieux ainsi que leurs supports sont identiques et la capacité de charge des motrices est de 160 passagers. Les motrices MR-63 se distinguent des MR-73 par l'inclusion d'un élément élastique entre les ressorts et le caisson qui procure une raideur moins importante de la suspension pour les MR-63. Les caractéristiques de masse et de raideur des motrices MR-63 et MR-73 apparaissent dans le tableau 1.

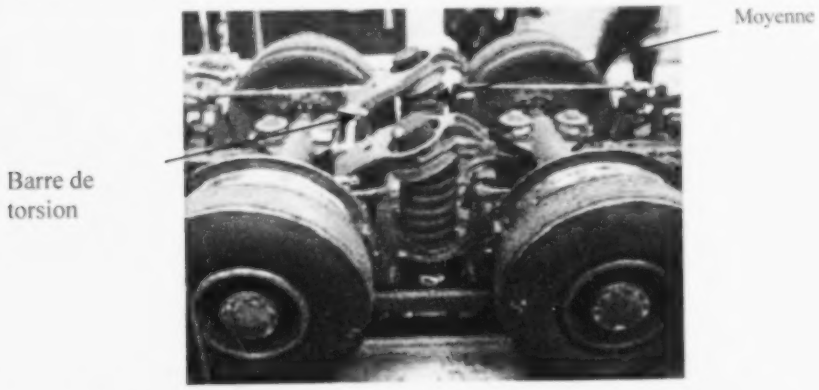


Figure 1 : Représentation du bogie et des éléments de suspension

TABLEAU 1 : Caractéristiques des motrices MR-63 et MR-73

Paramètre	MR-73	MR-63
Masse totale de la motrice (excluant les passagers)	26 990 kg	26 080 kg
Masse du caisson (excluant les bogies et les passagers)	13 960 kg	13 030 kg
Masse d'un bogie (complètement opérationnel)	6 515 kg	6 525 kg
Masse d'un essieu incluant arbres et moyeux (excluant roues d'acier, pneus et jantes)	907 kg	1 005 kg
Masse d'une moitié de l'arbre	32 kg	24- 28 kg
Masse d'un moyeu de roue	73 kg	76 -82 kg
Masse d'une roue d'acier	144 à 163 kg	144 à 163 kg
Masse d'un pneu (excluant la jante)	68 kg	68 kg
Masse d'une jante	51 kg	51 kg
Masse de la bague entre le bogie et l'essieu (4/essieu)	8 kg	8 kg
Élément élastique entre le ressort du bogie et le caisson (Force-déflexion)	Aucun	Maximum 25 mm sous charge de 35 kN
Masse du ressort de la suspension (entre caisson et bogie- 2) Raideur: Force (kg) –déflexion (mm)	24.5 kg 3000 kg; 335 ± 9 mm 3300 kg; 329 ±10 mm 7500 kg; -72 mm max.	24.5 kg 3 300 kg; 326 ± 7 mm 7 300 kg; - 75 ± 4 mm

3.2 Description des variables

En plus des types de motrice et du parcours, plusieurs variables sont susceptibles d'avoir une influence sur les caractéristiques des vibrations transmises aux opérateurs. Celles-ci incluent :

- La condition d'entretien : grande révision réalisée à intervales réguliers. Considérer l'inclusion de motrices étant dues pour un entretien et celles ayant subi un entretien;

- La condition (usure) des pneus : la durée de vie utile étant de 240 000 km, certaines motrices peuvent être munies de pneus ayant un degré d'usure très varié. Considérer l'inclusion de motrices munies de pneus neufs et d'autres dont le degré d'usure correspond à 1/3 de vie (80 000 km);

- La charge transportée : la charge est considérée comme étant plus grande en période de pointe (6 h à 9 h et 15 h à 18 h) qu'en période hors-pointe. Considérer la réalisation des mesures en périodes de pointe et hors-pointe;

- La position de la motrice : la motrice peut être positionnée en tête ou en queue de train, ou encore être intercalée entre les extrémités (i.e. chaque train de six voitures comporte deux remorques et quatre motrices). Considérer la réalisation des mesures pour des motrices opérant en tête et en queue de train. Pour un parcours aller-retour sur une ligne de métro, une motrice peut être en tête de train pour aller et en queue de train pour le retour;

- La vitesse de déplacement : la vitesse peut varier entre 0 et 75 km/h, qui constitue la vitesse maximale que peut atteindre le train.

3.3 Déroulement des essais

Deux motrices de chaque type (MR-63 et MR-73) sont sélectionnées pour réaliser les mesures dans des conditions normales d'opération. Ces motrices comportent deux voitures ayant subi un entretien complet (MR63-1 et MR73-1) et deux voitures étant dues pour un entretien (MR63-2 et MR73-2). De plus, des variations sont introduites sur l'usure des pneus installés sur les motrices sélectionnées pour inclure des pneus neufs (MR63-1a et MR73-1a), des pneus à 1/3 de vie (MR63-1b, MR63-2b, MR73-1b, MR73-2b) et les pneus actuels qui étaient installés sur les motrices au moment de la réalisation des essais (MR63-2a, MR73-2a). Les variations introduites quant au type de motrice, au niveau d'entretien et à l'usure des pneus font en sorte que huit motrices au total sont retenues pour réaliser l'ensemble des essais.

Pour la réalisation des essais, chaque motrice est amenée à opérer sur chacune des quatre lignes du métro pour y effectuer un parcours aller-retour complet. La motrice étant placée en tête de train, le déplacement dans une direction est réalisé en tête, tandis qu'au retour la motrice est placée en queue de train. Pour chacune des huit motrices, un parcours aller-retour est effectué en période de pointe et un autre est répété en période hors-pointe. Au total, le programme d'essais comporte 128 essais, soit 8 motrices x 2 périodes d'affluence/motrice x 2 positions/motrice x 4 lignes. Ces essais se sont déroulés sur une période de 16 jours à raison de 8 essais par jour, le tout étant réalisée dans des conditions d'opération normale du métro en transportant des passagers. Au total, 36 opérateurs de métro ont été impliqués dans la réalisation des essais.

La durée des essais (i.e. demi-parcours) a varié selon la ligne de métro impliqué : 5 minutes pour la ligne 4, 16 minutes sur la ligne 5, 37 minutes sur la ligne 1 et 44 minutes sur la ligne 2.

3.4 Métrologie des vibrations

Pour les besoins de l'évaluation des niveaux d'exposition vibratoire, de la caractérisation des classes spectrales vibratoires, de l'analyse de la performance du strapontin et du système de suspension, 22 canaux de mesure sont utilisés, répartis comme suit :

i. Quatre canaux pour mesurer les vibrations sur le strapontin à l'interface avec l'opérateur dans les directions x (longitudinal ou avant-arrière), y (latéral) et z (vertical) sur le coussin et x sur le dossier du strapontin. Ces mesures sont requises pour évaluer l'exposition du conducteur aux vibrations globales du corps selon les spécifications définies dans la norme ISO 2631-1 :1997 **[13]**. Deux accéléromètres de siège B&K 4322 sont utilisés pour réaliser ces mesures, l'un étant positionné sur le coussin, l'autre sur le dossier du siège;

ii. Trois canaux pour mesurer les vibrations au plancher de la loge directement sous le strapontin dans les directions x, y et z. Les mesures effectuées au plancher en direction verticale (axe z) sont jumelées à celles effectuées sur le coussin du strapontin pour déterminer le rapport de transmissibilité base-siège du strapontin en direction verticale et juger de son efficacité pour atténuer les vibrations. Les mesures effectuées selon les axes y et z servent de base de comparaison pour les mesures réalisées au siège. Un accéléromètre tri-axial B&K 4321 fixé au plancher à l'aide d'un aimant et positionné à proximité du point de fixation du strapontin est utilisé pour réaliser ces mesures;

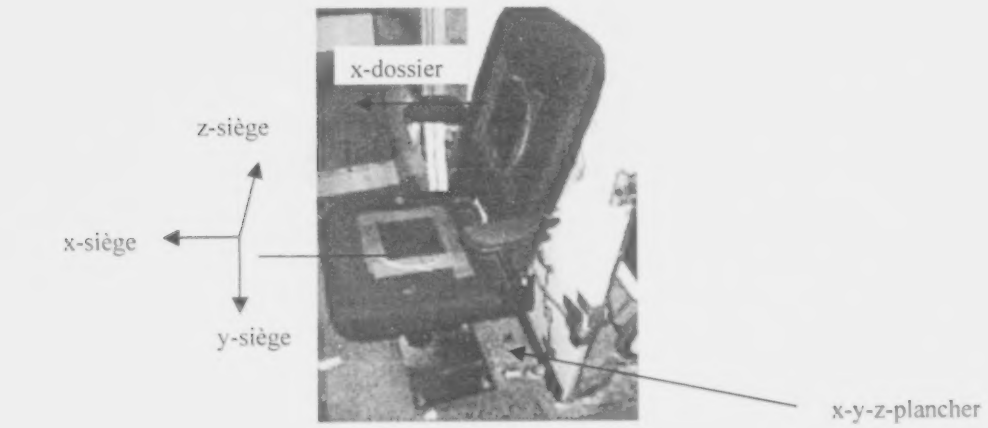
iii. Six canaux pour mesurer les vibrations translationnelles (accélérations) en directions x, y et z et rotationnelles (vélocités) de roulis, de tangage et de lacet au plancher de la motrice servant à caractériser son comportement dynamique selon les différents modes vibratoires et à définir les classes spectrales d'excitation vibratoire. Les mesures sont réalisées en utilisant un gyroscope Crossbow DMU^{TM} (Dynamic Measurement Unit) IMU400CC-100 fixé au plancher de la motrice dans la section des passagers directement derrière le strapontin;

iv. Six canaux pour mesurer les vibrations translationnelles (accélérations) en directions x, y et z et rotationnelles (vélocités) de roulis, de tangage et de lacet du bogie situé sous la loge de l'opérateur pour caractériser le comportement dynamique du bogie et évaluer l'efficacité du système de suspension entre celui-ci et le caisson. Les mesures sont réalisées en utilisant un gyroscope Crossbow DMU^{TM} (Dynamic Measurement Unit) IMU400CC-100 fixé sur le bogie au moyen d'une plaque en aluminium directement sous la cabine de l'opérateur;

v. Trois canaux pour mesurer les vibrations verticales (axe z), latérales (axe y) et de roulis sur un essieu des bogies. Un accéléromètre uni-axial Crossbow ±4 g série LP est installé du côté gauche de l'essieu avant pour mesurer les vibrations verticales directement sous la loge de l'opérateur. Un autre accéléromètre est positionné du côté droit de l'essieu pour mesurer les vibrations verticales et latérales. Les mouvements de roulis de l'essieu sont déterminés en utilisant les accélérations verticales mesurées de chaque côté de l'essieu.

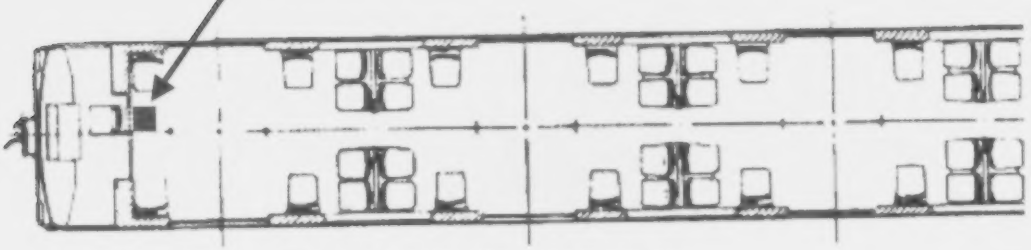
La figure 2 illustre la position des différents capteurs utilisés pour mesurer les vibrations sur le strapontin, le caisson, le bogie et l'essieu d'une motrice. Aux différents canaux de mesure,

s'ajoute un canal pour mesurer la vitesse instantanée de déplacement de la motrice en utilisant un tachomètre branché à l'indicateur de vitesse des motrices. L'ensemble des 23 canaux de données accélérométriques et de vitesse sont enregistrées en temps réel sur des enregistreurs multi-pistes. Lors du déroulement des mesures, des données descriptives du trajet en fonction de la position d'enregistrement des signaux sont relevées visant à associer des portions de relevés accélérométriques à des repères par rapport aux stations des lignes de métro impliquées. Au cours de l'acquisition, un contrôle visuel est exercé sur l'entrée des 23 canaux des enregistreurs pour assurer qu'il n'y ait pas d'anomalies, incluant des surcharges. La plage de fréquence d'intérêt pour les vibrations a été ajustée pour couvrir la gamme 0,4 à 100 Hz.

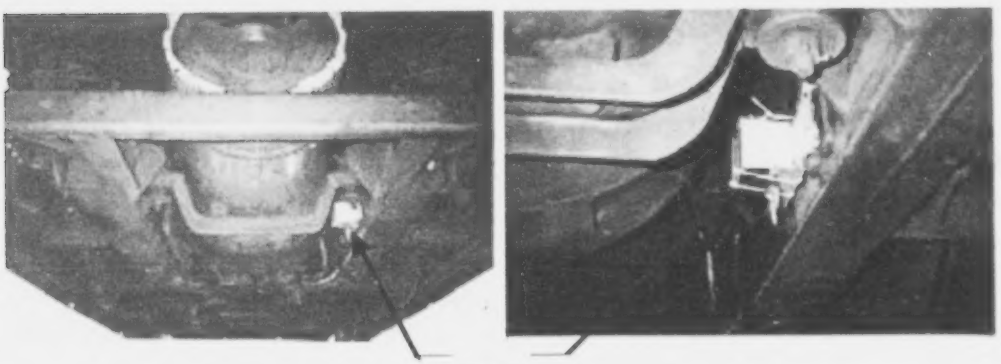


Strapontin

Localisation du gyroscope



Mesures des vibrations sur le caisson



Mesures des vibrations sur le bogie

Figure 2a : Localisation des points de mesure sur le strapontin, le caisson et le bogie

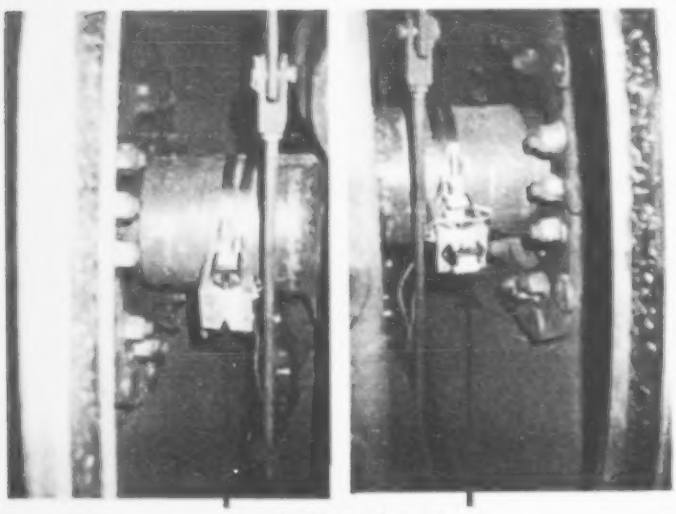


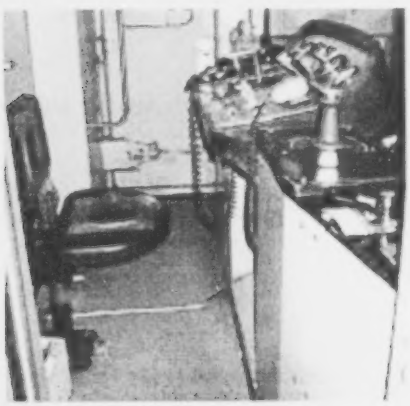
Figure 2b : Localisation des points de mesure des vibrations sur l'essieu

La durée d'enregistrement continu du signal vibratoire entre deux stations de métro varie dépendamment des stations entre 30 secondes et 3 minutes. Pour chaque essai, l'enregistrement est réalisé en continu pour couvrir le trajet total aller-retour sur chaque ligne (durée variant environ entre 10 minutes et 1,5 h).

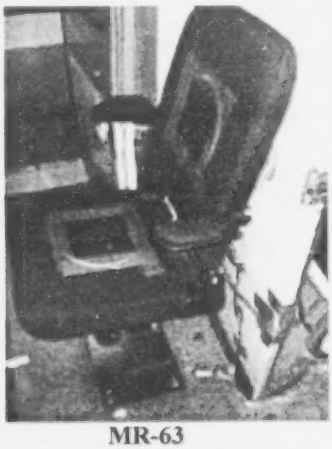
3.5 Caractéristiques des sièges

Deux types de sièges (strapontins) sont utilisés dont les caractéristiques diffèrent selon le type de motrice (voir figure 3). Dans les motrices MR-73, le siège est constitué d'un coussin d'environ 7 cm d'épaisseur, 42 cm de large et 32 cm de profondeur à son centre. Ce coussin est installé sur un poteau rigide permettant un réglage en hauteur de l'assise. Le coussin peut se rabattre sur le dossier pour permettre la conduite en posture debout. Quant au dossier, il est relié au coussin par un raccord métallique et ses dimensions sont de 42 cm de large, 26 cm de haut et 4 cm d'épaisseur. Un espace apparaît entre l'assise et le dossier de telle sorte que seul un appui de la partie supérieure du dos est rendu possible.

Le siège installé dans les motrices MR-63 comporte quant à lui un coussin de forme rectangulaire dont l'épaisseur est de 7 cm, la largeur de 43 cm et la profondeur de 36 cm. Le dossier a une épaisseur de 5 cm, une largeur de 41 cm et une hauteur de 49 cm et est directement relié au coussin, permettant ainsi un appui sur toute la longueur du dos. Le siège est muni d'accoudoirs et un dispositif pneumatique permet d'effectuer les réglages en hauteur. Tout comme pour le siège précédent, le coussin peut être rabattu sur le dossier pour permettre la conduite en posture debout.



MR-73



MR-63

Figure 3 : Représentation des strapontins utilisés dans les motrices MR-63 et MR-73

3.6 Ovalisation des pneus

Il s'agit d'un phénomène découlant d'une usure inégale de la semelle des pneus qui fait que ceux-ci ne sont pas parfaitement circulaires ou encore d'un déplacement latéral de la roue qui engendre une excentricité du fait qu'elle ne soit pas parfaitement centrée sur le moyeu. Les tolérances permises pour une telle ovalisation sont de 0,080 pouce. Or, il arrive que dans certains cas les valeurs mesurées pour l'ovalisation peuvent excéder les tolérances permises; c'est le cas notamment des motrices MR-73-1b, 63-1b et 63-2b utilisées dans cette étude. Pour la première motrice, il s'agissait du deuxième pneu du bogie avant du côté droit qui présentait une ovalisation hors norme, tandis que pour les deux dernières motrices, les pneus du bogie arrière du côté gauche étaient en cause. Il importe de souligner que les mêmes pneus ont été installés sur les motrices MR 63-1b et 63-2b pour la réalisation des essais. Lorsqu'un phénomène d'ovalisation hors-tolérances est rencontrée, la pratique consiste généralement à remplacer les pneus sur les motrices concernées. D'ailleurs lorsqu'une situation est rapportée impliquant la perception de fortes vibrations par les opérateurs (aussi appellée 'sautillement'), il est d'usage de faire un remplacement des pneus sur les motrices en cause. Selon les informations rapportées, ce phénomène serait davantage présent sur la ligne 1 qui implique l'utilisation exclusive des motrices MR 63. Aussi l'enquête de perception réalisée dans le cadre de l'étude ergonomique **[11]** qui accompagnait la présente étude révélait qu'un taux plus élevé des opérateurs ayant travaillé sur la ligne 1 au cours des sept derniers jours rapportaient avoir été incommodés par les vibrations comparativement aux opérateurs des autres lignes de métro. De plus, plusieurs opérateurs de métro rapportaient des problèmes de santé potentiellement attribuables à l'exposition aux vibrations en plus de ressentir de l'inconfort, et ce pour des opérations effectuées sur l'ensemble des lignes du métro. Il y avait donc lieu de considérer qu'au-delà des contraintes liées à l'aménagement non optimal du poste de travail, la possibilité que les vibrations aient pu contribuer à l'apparition des problèmes soulevés.

3.7 Profil de la surface de roulement

Il est bien connu que les irrégularités de la piste de roulement peuvent constituer une source importante de vibrations transmises dans les véhicules. Or, les pistes de roulement utilisées dans les tunnels du métro de Montréal sont constituées de dalles de béton de 18 pieds de longueur qui sont fixées directement sur le radier. L'espacement entre les pièces est de 6 ± 2 mm tandis que les tolérances sur le nivellement de la pièce elle-même et entre les pièces se situent à l'intérieur de ±3 mm. Une étude réalisée en parallèle avec celle portant sur les mesures de vibrations a démontré que le niveau de défaut de planéité des pistes de roulement du métro de Montréal est très faible, l'indice de planéité IRI ayant été mesuré comme étant inférieur à 2 m/km **[12]**. Ce niveau de défaut d'uni est considéré comme étant très faible et négligeable de sorte qu'il soit jugé comme étant peu susceptible d'être une source importante de vibrations transmises dans le métro.

4. RÉSULTATS DES MESURES DE L'EXPOSITION AUX VIBRATIONS

Cette partie de l'étude concerne essentiellement les résultats des mesures de vibrations réalisées sur les strapontins et le plancher des huit motrices impliquées, notamment pour les axes de mesure x-siège, y-siège, z-siège et x-dossier à l'interface entre l'opérateur et le strapontin, ainsi que x-plancher, y-plancher et z-plancher à proximité du point de fixation du siège. Les tableaux A.1 à A.8 de l'annexe A présentent l'ensemble des résultats mesurés selon ces axes et points de mesure pour chaque motrice et condition d'essai. Ces résultats représentent les valeurs moyennes des accélérations efficaces pondérées, a_w, telles que déterminées selon les spécifications de la norme ISO 2631-1 :1997. Les pondérations en fréquence qui sont appliquées diffèrent selon les axes de mesure et suivent les recommandations de la norme ISO 2631-1 :1997. Les valeurs moyennes rapportées pour chaque ligne sont établies sur la base des accélérations efficaces pondérées mesurées pour chaque interstation composant une ligne complète de métro d'une extrémité à l'autre. L'écart-type procure donc une indication de la variabilité des niveaux vibratoires entre les stations. Par ailleurs, le facteur SEAT apparaissant dans ces tableaux représente le ratio de l'accélération efficace pondérée siège à celle mesurée au plancher en direction verticale (axe z). De façon générale, les résultats rapportés dans les tableaux A.1 à A.8 démontrent que :

1. les niveaux prédominants des vibrations sur le siège apparaissent selon l'axe z-siège;

2. la position de la motrice (tête vs queue de train) ainsi que la période d'affluence (pointe vs hors-pointe) ont un effet négligeable sur les niveaux moyens mesurés.

Considérant que la position de la motrice et la période d'affluence ont peu d'influence sur les niveaux mesurés, les tableaux 2 et 3 présentent les valeurs moyennes des accélérations efficaces pondérées a_w ainsi que l'écart-type sur les valeurs moyennes mesurées pour chacune des motrices sortant d'un entretien (tableau 2) et celles étant dues pour un entretien (tableau 3). Ces moyennes sont établies en combinant les valeurs moyennes mesurées sur chaque ligne pour les conditions pointe/hors-pointe et tête et queue de train (quatre conditions) qui n'ont pas d'influence sur les résultats. Pour chaque ligne de métro, les données de base applicables à chaque condition d'essai représentent la moyenne des accélérations efficaces mesurées pour chaque interstation. Les sections suivantes s'appuient sur les données présentées dans les tableaux 2 et 3.

4.1 Caractérisation de l'exposition vibratoire en direction verticale

Les tableaux des accélérations efficaces pondérées (W_k) présentés dans les tableaux 2 et 3 pour les vibrations mesurées au siège en direction verticale démontrent généralement que les niveaux d'exposition ont tendance à être plus élevés dans les motrices MR-63 que dans les MR-73, particulièrement lorsqu'elles sont munies de pneus présentant une ovalisation hors-tolérance (MR63-1b, MR63-2b).

TABLEAU 2 : Motrices sortant d'un entretien complet – Moyennes des accélérations efficaces pondérées mesurées sur chaque ligne selon chaque axe et point de mesure (combinant périodes de pointe et hors-pointe et position tête et queue de train)

Ligne/motrice	a_w (ms^{-2})							SEAT
	x-siège	y-siège	z-siège	x-plancher	y-plancher	z-plancher	x-dossier	
Ligne 1								
MR63-1a	0,09±0,01	0,19±0,02	0,44±0,07	0,06±0,01	0,16±0,02	0,37±0,06	0,26±0,04	1,19
MR63-1b	0,09±0,01	0,17±0,02	0,54±0,14	0,07±0,01	0,16±0,02	0,51±0,14	0,34±0,07	1,06
MR73-1a	0,08±0,01	0,19±0,02	0,40±0,03	0,06±0,01	0,17±0,02	0,38±0,03	0,16±0,02	1,05
MR73-1b	0,08±0,01	0,19±0,02	0,43±0,04	0,06±0,01	0,17±0,02	0,40±0,03	0,18±0,02	1,08
Ligne 2								
MR63-1a	0,08±0,01	0,18±0,02	0,42±0,08			0,35±0,07	0,27±0,04	1,20
MR63-1b	0,09±0,01	0,18±0,02	0,54±0,14			0,50±0,16	0,32±0,07	1,08
MR73-1a	0,08±0,02	0,18±0,02	0,39±0,04			0,38±0,04	0,17±0,04	1,03
MR73-1b	0,07±0,01	0,17±0,02	0,41±0,04			0,39±0,04	0,17±0,02	1,05
Ligne 4								
MR63-1a	0,11±0,007	0,19±0,02	0,51±0,03	0,09±0,004	0,17±0,02	0,45±0,04	0,30±0,03	1,13
MR63-1b	0,11±0,004	0,18±0,02	0,74±0,10	0,09±0,002	0,17±0,02	0,74±0,14	0,39±0,03	1,0
MR73-1a	0,08±0,006	0,20±0,03	0,45±0,03	0,06±0,004	0,18±0,03	0,43±0,03	0,16±0,01	1,05
MR73-1b	0,08±0,01	0,19±0,03	0,45±0,03	0,06±0,01	0,17±0,04	0,43±0,03	0,16±0,01	1,05
Ligne 5								
MR63-1a	0,08±0,01	0,16±0,02	0,38±0,08			0,34±0,08	0,26±0,04	1,12
MR63-1b	0,09±0,01	0,16±0,02	0,50±0,14			0,50±0,16	0,29±0,06	1,0
MR73-1a	0,08±0,01	0,17±0,01	0,37±0,04			0,34±0,04	0,16±0,03	1,09
MR73-1b	0,07±0,01	0,16±0,02	0,36±0,04			0,35±0,03	0,17±0,04	1,03

TABLEAU 3 : Motrices dues pour un entretien complet – Moyennes des accélérations efficaces pondérées mesurées sur chaque ligne selon chaque axe et point de mesure (combinant périodes de pointe et hors-pointe et position tête et queue de train)

Ligne/motrice	a_w (ms^{-2})							SEAT
	x-siège	y-siège	z-siège	x-plancher	y-plancher	z-plancher	x-dossier	
Ligne 1								
MR63-2a	0,08±0,01	0,17±0,02	0,48±0,09	0,06±0,008	0,16±0,03	0,41±0,08	0,31±0,06	1,17
MR63-2b	0,12±0,02	0,18±0,02	0,62±0,16	0,06±0,009	0,16±0,02	0,58±0,20	0,29±0,07	1,07
MR73-2a	0,10±0,01	0,21±0,03	0,46±0,06	0,08±0,02	0,18±0,02	0,42±0,05	0,24±0,05	1,10
MR73-2b	0,08±0,01	0,19±0,03	0,42±0,04	0,08±0,01	0,18±0,02	0,40±0,03	0,17±0,02	1,05
Ligne 2								
MR63-2a	0,09±0,02	0,17±0,02	0,42±0,06			0,38±0,06	0,30±0,04	1,10
MR63-2b	0,09±0,02	0,18±0,02	0,58±0,14			0,52±0,14	0,40±0,08	1,12
MR73-2a	0,08±0,01	0,18±0,02	0,46±0,07			0,42±0,06	0,20±0,04	1,10
MR73-2b	0,08±0,01	0,18±0,02	0,42±0,05			0,40±0,04	0,18±0,02	1,05
Ligne 4								
MR63-2a	0,11±0,01	0,19±0,02	0,53±0,05	0,08±0,008	0,17±0,02	0,49±0,06	0,40±0,03	1,08
MR63-2b	0,12±0,01	0,19±0,02	0,68±0,12	0,08±0,008	0,17±0,02	0,70±0,16	0,39±0,05	0,97
MR73-2a	0,09±0,01	0,22±0,03	0,53±0,04	0,08±0,009	0,19±0,03	0,51±0,04	0,22±0,02	1,04
MR73-2b	0,09±0,006	0,19±0,02	0,50±0,03	0,08±0,006	0,18±0,02	0,47±0,03	0,18±0,02	1,06
Ligne 5								
MR63-2a	0,09±0,01	0,16±0,02	0,41±0,07			0,36±0,07	0,31±0,06	1,14
MR63-2b	0,09±0,01	0,16±0,02	0,52±0,14			0,52±0,16	0,30±0,06	1,0
MR73-2a	0,08±0,02	0,17±0,02	0,39±0,05			0,37±0,04	0,19±0,03	1,05
MR73-2b	0,08±0,01	0,17±0,02	0,39±0,04			0,36±0,04	0,18±0,03	1,08

De façon plus détaillée, les tableaux 4 à 7 présentent, respectivement pour chaque ligne de métro, les valeurs des accélérations efficaces pondérées mesurées au siège en direction verticale pour chaque interstation et chacune des conditions d'essai (8 motrices x 2 périodes d'affluence x 2 positions). Un code couleur a été appliqué dans ces tableaux pour distinguer l'ordre de grandeur des niveaux mesurés, lesquels sont basés sur les valeurs de référence définies dans la norme ISO 2631-1 :1997 pour délimiter la « zone de précaution santé », c'est-à dire entre 0,45 et 0,90 ms^{-2} pour une durée d'exposition quotidienne de huit heures. Les résultats présentés dans les tableaux 4 à 7 démontrent généralement que :

1. Des variations importantes peuvent apparaître entre certaines interstations, lesquelles peuvent atteindre 100% et plus. Plusieurs des interstations présentant les niveaux les plus élevés de vibration se distinguent par le fait qu'elles présentent une distance de parcours plus longue et une vitesse plus élevée de déplacement, laquelle peut être soutenue sur une période de temps plus longue. La section 4.4 traite du lien qui peut être établi entre le niveau d'exposition vibratoire et la vitesse de déplacement.

2. Les niveaux d'exposition vibratoire en direction verticale ont tendance à être plus élevés dans les motrices MR-63 que dans les motrices MR-73. Les codes couleurs appliqués dans les tableaux 4 à 7 démontrent effectivement que le nombre d'interstations pour lesquelles l'accélération efficace pondérée est inférieure à 0,45 ms^{-2} est plus important dans la moitié inférieure du tableau qui s'applique exclusivement aux quatre motrices MR-73 que dans la partie supérieure pour les MR-63.

3. Des différences des niveaux d'exposition vibratoire apparaissent entre certaines lignes de métro pour des motrices identiques se déplaçant sur celles-ci. En particulier, les niveaux ont tendance à être plus faibles sur la ligne 5, plus élevés sur la ligne 4 tandis que sur les lignes 1 et 2, les niveaux sont similaires et se situent entre ceux des lignes 5 et 4 (voir aussi les tableaux 2 et 3).

4. Sur des lignes de métro identiques, les motrices MR-73 mènent à des niveaux d'exposition aux vibrations verticales similaires peu importe l'état d'usure des pneus. Ces niveaux sont d'ailleurs comparables à ceux mesurés avec les motrices MR-63 munis de pneus neufs (MR63-1a) et actuels (MR63-2a), mais se différencient clairement de ceux mesurés avec les motrices MR-63 munis de pneus qui présentaient une ovalisation importante hors tolérance (MR63-1b et MR63-2b). En effet, les motrices MR-63 munies de ce type de pneus ont tendance à engendrer des niveaux beaucoup plus élevés de vibrations que pour l'ensemble des autres motrices.

Compte tenu du peu d'influence lié à l'état d'entretien des motrices et au type de parcours pour les lignes 1 et 2, les résultats des accélérations efficaces pondérées présentés dans les tableaux 2 et 3 pour la direction z-siège sont combinés pour définir les valeurs moyennes applicables aux différents types de motrice opérant sur les différentes lignes de métro. Le tableau 8 présente un sommaire des niveaux d'accélération efficace moyens mesurés sur chaque ligne de métro (une portion seulement aller ou retour) pour chaque type de motrice. Les valeurs apparaissant dans le tableau 8 sont calculées en faisant la moyenne des valeurs moyennes des accélérations définies dans les tableaux 2 et 3 pour chaque type de motrice. Pour les motrices MR-73 opérant sur les

TABLEAU 4 : Accélération efficace pondérée mesurée pour chaque interstation sur la ligne 1 pour chaque condition d'essai

Description				Accélération efficace globale pondérée a_w (m/s²)																									$\overline{a_w}$	s
Charge	Motrice et état	Direction	Localisa. motrice	Interstation																										
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26		
Pointe	MR63-1a	HB→Angrignon	Queue	0,397	0,312	0,308	0,358	0,387	0,266	0,375	0,259	0,420	0,397	0,355	0,313	0,337	0,319	0,291	0,337	0,390	0,424	0,471	0,533	0,414	0,379	0,400	0,337	0,503	0,347	0,387	0,067
Pointe	MR63-1a	Angrignon→HB	Tête	0,386	0,513	0,364	0,388	0,506	0,429	0,444	0,389	0,380	0,505	0,519	0,417	0,381	0,373	0,326	0,434	0,403	0,411	0,401	0,373	0,438	0,465	0,386	0,389	0,418	0,402	0,431	0,058
Pointe	MR63-1b	HB→Angrignon	Queue	0,493	0,415	0,415	0,604	0,606	0,384	0,486	0,360	0,693	0,731	0,456	0,383	0,375	0,406	0,409	0,371	0,458	0,501	0,779	0,551	0,420	0,516	0,443	0,376	0,668	0,424	0,525	0,127
Pointe	MR63-1b	Angrignon→HB	Tête	0,309	0,437	0,460	0,485	0,450	0,559	0,435	0,282	0,598	0,584	0,380	0,416	0,358	0,344	0,267	0,367	0,378	0,823	0,585	0,663	0,755	0,622	0,632	0,527	0,585	0,607	0,526	0,149
Pointe	MR63-2a	HB→Angrignon	Queue	0,636	0,433	0,451	0,536	0,516	0,371	0,482	0,402	0,583	0,543	0,374	0,421	0,407	0,436	0,350	0,413	0,601	0,543	0,531	0,535	0,375	0,417	0,460	0,457	0,848	0,380	0,490	0,087
Pointe	MR63-2a	Angrignon→HB	Tête	0,381	0,386	0,416	0,476	0,574	0,426	0,520	0,332	0,382	0,481	0,378	0,432	0,384	0,384	0,348	0,468	0,461	0,693	0,573	0,514	0,486	0,501	0,478	0,680	0,545	0,624	0,490	0,106
Pointe	MR63-2b	HB→Angrignon	Queue	0,722	0,462	0,407	0,544	0,586	0,352	0,553	0,361	0,508	0,522	0,515	0,442	0,510	0,534	0,374	0,371	0,444	0,492	0,875	1,077	0,455	0,377	0,497	0,596	0,856	0,469	0,584	0,186
Pointe	MR63-2b	Angrignon→HB	Tête	0,491	0,667	0,538	0,554	0,561	0,493	0,650	0,538	0,838	0,848	0,547	0,500	0,417	0,418	0,509	0,489	0,438	0,523	0,707	0,512	0,395	0,548	0,544	0,729	0,882	0,472	0,589	0,126
Hors pointe	MR63-1a	HB→Angrignon	Queue	0,370	0,338	0,381	0,386	0,420	0,380	0,488	0,282	0,424	0,369	0,431	0,384	0,397	0,441	0,387	0,418	0,482	0,497	0,533	0,661	0,493	0,536	0,541	0,486	0,841	0,508	0,466	0,096
Hors pointe	MR63-1a	Angrignon→HB	Tête	0,357	0,454	0,392	0,403	0,471	0,461	0,489	0,411	0,442	0,535	0,529	0,430	0,414	0,386	0,346	0,466	0,424	0,504	0,467	0,510	0,463	0,536	0,480	0,421	0,434	0,385	0,451	0,053
Hors pointe	MR63-1b	HB→Angrignon	Queue	0,511	0,870	0,560	0,732	0,801	0,514	0,754	0,365	0,692	0,774	0,600	0,396	0,388	0,373	0,356	0,401	0,561	0,703	0,672	0,648	0,550	0,535	0,531	0,532	0,797	0,540	0,611	0,147
Hors pointe	MR63-1b	Angrignon→HB	Tête	0,335	0,523	0,412	0,543	0,493	0,388	0,436	0,304	0,540	0,610	0,329	0,399	0,406	0,429	0,350	0,350	0,351	0,588	0,603	0,473	0,671	0,580	0,472	0,512	0,685	0,512	0,512	0,129
Hors pointe	MR63-2a	HB→Angrignon	Queue	0,431	0,513	0,506	0,400	0,398	0,447	0,535	0,329	0,592	0,439	0,391	0,387	0,348	0,384	0,325	0,452	0,518	0,475	0,470	0,643	0,493	0,478	0,453	0,376	0,584	0,571	0,474	0,086
Hors pointe	MR63-2a	Angrignon→HB	Tête	0,366	0,423	0,452	0,453	0,478	0,486	0,367	0,341	0,440	0,445	0,361	0,406	0,365	0,389	0,356	0,436	0,422	0,473	0,539	0,637	0,442	0,472	0,493	0,508	0,571	0,628	0,466	0,078
Hors pointe	MR63-2b	HB→Angrignon	Queue	0,536	0,662	0,523	0,508	0,458	0,532	0,505	0,395	0,576	0,807	0,458	0,491	0,462	0,478	0,466	0,519	0,788	0,590	0,829	0,766	0,444	0,409	0,473	0,443	1,126	0,621	0,607	0,160
Hors pointe	MR63-2b	Angrignon→HB	Tête	0,466	0,455	0,889	0,845	0,529	0,794	0,779	0,616	0,927	0,843	0,720	0,521	0,423	0,427	0,376	0,509	0,575	0,582	0,675	0,958	0,465	0,723	0,906	0,798	0,682	0,634	0,686	0,177
Pointe	MR73-1a	HB→Angrignon	Queue	0,419	0,329	0,323	0,366	0,362	0,319	0,388	0,396	0,384	0,373	0,348	0,383	0,418	0,421	0,412	0,399	0,365	0,388	0,404	0,389	0,352	0,363	0,375	0,347	0,381	0,347	0,374	0,029
Pointe	MR73-1a	Angrignon→HB	Tête	0,389	0,389	0,377	0,418	0,408	0,359	0,374	0,350	0,439	0,454	0,418	0,411	0,399	0,402	0,392	0,401	0,428	0,448	0,433	0,431	0,375	0,389	0,409	0,404	0,399	0,396	0,406	0,027
Pointe	MR73-1b	HB→Angrignon	Queue	0,474	0,436	0,393	0,371	0,356	0,340	0,370	0,351	0,358	0,364	0,353	0,383	0,404	0,444	0,390	0,438	0,415	0,450	0,446	0,378	0,420	0,428	0,373	0,361	0,379	0,397	0,398	0,037
Pointe	MR73-1b	Angrignon→HB	Tête	0,418	0,478	0,428	0,466	0,461	0,430	0,427	0,393	0,464	0,468	0,447	0,515	0,508	0,472	0,488	0,482	0,428	0,444	0,455	0,428	0,438	0,432	0,451	0,450	0,433	0,426	0,450	0,029
Pointe	MR73-2a	HB→Angrignon	Queue	0,459	0,360	0,358	0,423	0,407	0,390	0,341	0,363	0,421	0,394	0,367	0,393	0,387	0,417	0,379	0,495	0,470	0,495	0,411	0,448	0,460	0,483	0,444	0,457	0,449	0,402	0,421	0,046
Pointe	MR73-2a	Angrignon→HB	Tête	0,434	0,450	0,445	0,431	0,448	0,461	0,511	0,384	0,438	0,586	0,591	0,521	0,474	0,500	0,420	0,460	0,448	0,473	0,443	0,453	0,556	0,553	0,464	0,452	0,442	0,442	0,475	0,059
Pointe	MR73-2b	HB→Angrignon	Queue	0,434	0,338	0,317	0,395	0,386	0,394	0,398	0,359	0,377	0,378	0,380	0,412	0,437	0,444	0,416	0,446	0,429	0,427	0,426	0,442	0,393	0,434	0,412	0,408	0,420	0,396	0,400	0,036
Pointe	MR73-2b	Angrignon→HB	Tête	0,377	0,420	0,412	0,427	0,480	0,511	0,432	0,332	0,436	0,479	0,435	0,497	0,449	0,428	0,429	0,456	0,455	0,463	0,441	0,436	0,410	0,413	0,407	0,423	0,427	0,428	0,436	0,036
Hors pointe	MR73-1a	HB→Angrignon	Queue	0,453	0,405	0,360	0,378	0,363	0,301	0,366	0,326	0,395	0,418	0,401	0,424	0,428	0,431	0,390	0,362	0,365	0,406	0,388	0,444	0,413	0,410	0,376	0,351	0,404	0,386	0,393	0,035
Hors pointe	MR73-1a	Angrignon→HB	Tête	0,356	0,401	0,395	0,440	0,421	0,396	0,453	0,368	0,396	0,395	0,397	0,435	0,402	0,392	0,383	0,426	0,456	0,437	0,423	0,400	0,413	0,402	0,413	0,386	0,428	0,451	0,411	0,029
Hors pointe	MR73-1b	HB→Angrignon	Queue	0,397	0,347	0,316	0,388	0,401	0,358	0,392	0,381	0,395	0,418	0,423	0,440	0,424	0,422	0,390	0,367	0,365	0,458	0,475	0,432	0,405	0,497	0,412	0,390	0,426	0,428	0,411	0,046
Hors pointe	MR73-1b	Angrignon→HB	Tête	0,384	0,422	0,391	0,461	0,471	0,459	0,435	0,378	0,474	0,479	0,488	0,434	0,433	0,438	0,427	0,399	0,436	0,483	0,491	0,485	0,463	0,469	0,463	0,424	0,460	0,444	0,447	0,032
Hors pointe	MR73-2a	HB→Angrignon	Queue	0,463	0,368	0,432	0,482	0,408	0,362	0,392	0,408	0,402	0,445	0,519	0,520	0,477	0,493	0,495	0,528	0,536	0,457	0,472	0,455	0,450	0,583	0,495	0,446	0,469	0,406	0,459	0,053
Hors pointe	MR73-2a	Angrignon→HB	Tête	0,432	0,626	0,533	0,455	0,448	0,446	0,432	0,339	0,436	0,531	0,548	0,516	0,507	0,492	0,403	0,511	0,466	0,452	0,466	0,572	0,485	0,419	0,423	0,442	0,472	0,526	0,479	0,060
Hors pointe	MR73-2b	HB→Angrignon	Queue	0,476	0,416	0,409	0,458	0,419	0,349	0,378	0,413	0,419	0,390	0,378	0,444	0,489	0,512	0,436	0,456	0,412	0,511	0,440	0,416	0,402	0,479	0,417	0,381	0,415	0,379	0,421	0,039
Hors pointe	MR73-2b	Angrignon→HB	Tête	0,410	0,415	0,496	0,469	0,458	0,408	0,426	0,366	0,415	0,469	0,397	0,421	0,379	0,405	0,428	0,454	0,438	0,519	0,525	0,446	0,456	0,460	0,457	0,428	0,452	0,478	0,443	0,039

0.45m/s² > a_w
0.45m/s² ≤ a_w < 0.55m/s²
0.55m/s² ≤ a_w < 0.75m/s²
0.75m/s² ≤ a_w < 0.90m/s²
0.90m/s² < a_w
0.90 m/s² < a_w

Honoré Beaugrand, Radisson, Langelier, Cadillac, Assomption, Viau, Pie-IX, Joliette, Préfontaine, Frontenac, Papineau, Beaudry, Berri-UQAM, Saint-Laurent, Place-des-Arts, McGill, Peel, Guy-Concordia, Atwater, Lionel-Groulx, Charlevoix, LaSalle, De l'Église, Verdun, Jolicoeur, Monk, Angrignon

TABLEAU 4 : Accélération efficace pondérée mesurée pour chaque interstation sur la ligne 1 pour chaque condition d'essai

Description				Accélération efficace globale pondérée a_w (m/s²)																									a_w	S
Charge	Matrice et état	Direction	Localisation matrice	Interstation																										
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26		
Pointe	MR63-1a	HB→Angrignon	Queue	0,397	0,312	0,308	0,356	0,387	0,296	0,375	0,259	0,420	0,397	0,355	0,313	0,337	0,319	0,291	0,337	0,390	0,424	0,471	0,533	0,414	0,379	0,400	0,337	0,503	0,347	0,385	0,067
Pointe	MR63-1a	Angrignon→HB	Tête	0,385	0,513	0,384	0,396	0,506	0,429	0,444	0,389	0,380	0,595	0,619	0,417	0,361	0,373	0,326	0,434	0,403	0,411	0,401	0,373	0,438	0,465	0,386	0,389	0,418	0,402	0,431	0,068
Pointe	MR63-1b	HB→Angrignon	Queue	0,493	0,415	0,415	0,604	0,606	0,354	0,486	0,360	0,693	0,731	0,456	0,393	0,375	0,409	0,409	0,371	0,458	0,501	0,779	0,551	0,420	0,516	0,443	0,376	0,668	0,424	0,525	0,127
Pointe	MR63-1b	Angrignon→HB	Tête	0,309	0,437	0,460	0,485	0,450	0,569	0,435	0,282	0,598	0,554	0,360	0,416	0,356	0,344	0,267	0,367	0,376	0,823	0,585	0,663	0,755	0,622	0,632	0,527	0,585	0,607	0,526	0,145
Pointe	MR63-2a	HB→Angrignon	Queue	0,636	0,433	0,451	0,536	0,516	0,371	0,482	0,402	0,583	0,543	0,374	0,421	0,407	0,436	0,350	0,413	0,601	0,543	0,531	0,535	0,375	0,417	0,460	0,457	0,648	0,380	0,490	0,087
Pointe	MR63-2a	Angrignon→HB	Tête	0,381	0,395	0,416	0,476	0,574	0,426	0,520	0,332	0,392	0,481	0,378	0,432	0,354	0,364	0,348	0,468	0,461	0,693	0,573	0,514	0,486	0,501	0,478	0,680	0,545	0,624	0,490	0,108
Pointe	MR63-2b	HB→Angrignon	Queue	0,722	0,462	0,407	0,544	0,586	0,352	0,553	0,361	0,508	0,522	0,515	0,442	0,510	0,534	0,374	0,371	0,444	0,492	0,879	1,977	0,455	0,377	0,497	0,596	0,856	0,469	0,584	0,168
Pointe	MR63-2b	Angrignon→HB	Tête	0,491	0,667	0,538	0,554	0,561	0,493	0,650	0,538	0,838	0,648	0,547	0,500	0,417	0,419	0,509	0,489	0,430	0,523	0,707	0,512	0,395	0,548	0,544	0,729	0,882	0,472	0,586	0,126
Hors pointe	MR63-1a	HB→Angrignon	Queue	0,379	0,339	0,381	0,385	0,420	0,380	0,488	0,282	0,424	0,369	0,431	0,384	0,397	0,441	0,387	0,418	0,482	0,497	0,533	0,661	0,493	0,536	0,541	0,486	0,641	0,508	0,466	0,090
Hors pointe	MR63-1a	Angrignon→HB	Tête	0,357	0,454	0,392	0,403	0,471	0,441	0,489	0,411	0,442	0,535	0,529	0,430	0,414	0,386	0,346	0,466	0,424	0,504	0,467	0,510	0,463	0,536	0,460	0,421	0,434	0,365	0,459	0,052
Hors pointe	MR63-1b	HB→Angrignon	Queue	0,511	0,670	0,560	0,732	0,891	0,514	0,754	0,365	0,692	0,774	0,600	0,396	0,368	0,373	0,358	0,401	0,561	0,703	0,672	0,648	0,550	0,535	0,531	0,532	0,797	0,540	0,611	0,147
Hors pointe	MR63-1b	Angrignon→HB	Tête	0,335	0,523	0,412	0,543	0,493	0,368	0,436	0,304	0,540	0,810	0,329	0,399	0,406	0,429	0,350	0,350	0,351	0,588	0,603	0,473	0,671	0,580	0,472	0,512	0,685	0,512	0,512	0,126
Hors pointe	MR63-2a	HB→Angrignon	Queue	0,431	0,513	0,506	0,400	0,396	0,447	0,535	0,329	0,592	0,439	0,391	0,387	0,346	0,364	0,325	0,452	0,518	0,475	0,470	0,643	0,493	0,478	0,453	0,376	0,584	0,571	0,474	0,088
Hors pointe	MR63-2a	Angrignon→HB	Tête	0,365	0,423	0,452	0,453	0,478	0,486	0,397	0,341	0,440	0,445	0,381	0,408	0,365	0,389	0,356	0,435	0,422	0,473	0,539	0,637	0,442	0,472	0,493	0,508	0,571	0,628	0,466	0,078
Hors pointe	MR63-2b	HB→Angrignon	Queue	0,536	0,662	0,523	0,508	0,458	0,532	0,505	0,395	0,576	0,607	0,458	0,491	0,462	0,478	0,466	0,519	0,799	0,590	0,829	0,765	0,444	0,409	0,473	0,443	1,139	0,621	0,607	0,169
Hors pointe	MR63-2b	Angrignon→HB	Tête	0,466	0,455	0,889	0,645	0,529	0,794	0,779	0,616	0,927	0,843	0,720	0,521	0,423	0,427	0,378	0,509	0,575	0,582	0,676	0,956	0,465	0,723	0,906	0,798	0,682	0,634	0,686	0,171
Pointe	MR73-1a	HB→Angrignon	Queue	0,419	0,329	0,323	0,386	0,362	0,319	0,388	0,396	0,384	0,373	0,348	0,383	0,418	0,421	0,412	0,396	0,365	0,388	0,404	0,389	0,352	0,363	0,375	0,347	0,361	0,347	0,374	0,029
Pointe	MR73-1a	Angrignon→HB	Tête	0,389	0,389	0,377	0,418	0,408	0,359	0,374	0,350	0,439	0,454	0,416	0,411	0,390	0,402	0,392	0,401	0,428	0,448	0,433	0,431	0,375	0,369	0,409	0,404	0,398	0,395	0,406	0,027
Pointe	MR73-1b	HB→Angrignon	Queue	0,474	0,438	0,393	0,371	0,356	0,340	0,370	0,351	0,358	0,364	0,353	0,383	0,404	0,444	0,390	0,438	0,415	0,450	0,446	0,378	0,420	0,428	0,373	0,361	0,379	0,397	0,396	0,037
Pointe	MR73-1b	Angrignon→HB	Tête	0,419	0,478	0,428	0,466	0,461	0,430	0,427	0,393	0,464	0,468	0,447	0,515	0,508	0,472	0,488	0,482	0,428	0,444	0,455	0,428	0,438	0,432	0,451	0,450	0,433	0,439	0,450	0,028
Pointe	MR73-2a	HB→Angrignon	Queue	0,459	0,360	0,358	0,423	0,407	0,350	0,341	0,363	0,421	0,394	0,367	0,393	0,397	0,417	0,379	0,495	0,470	0,495	0,411	0,448	0,460	0,483	0,444	0,457	0,449	0,402	0,421	0,046
Pointe	MR73-2a	Angrignon→HB	Tête	0,434	0,450	0,445	0,431	0,446	0,461	0,511	0,384	0,438	0,586	0,591	0,621	0,474	0,500	0,420	0,460	0,448	0,473	0,443	0,453	0,558	0,553	0,464	0,452	0,442	0,442	0,479	0,050
Pointe	MR73-2b	HB→Angrignon	Queue	0,434	0,338	0,317	0,395	0,389	0,353	0,398	0,359	0,377	0,370	0,350	0,412	0,437	0,444	0,416	0,446	0,420	0,427	0,426	0,442	0,393	0,434	0,412	0,408	0,420	0,358	0,400	0,036
Pointe	MR73-2b	Angrignon→HB	Tête	0,377	0,420	0,412	0,427	0,480	0,511	0,432	0,332	0,436	0,479	0,435	0,497	0,449	0,429	0,420	0,456	0,455	0,463	0,441	0,436	0,410	0,413	0,407	0,423	0,427	0,428	0,436	0,036
Hors pointe	MR73-1a	HB→Angrignon	Queue	0,453	0,405	0,380	0,379	0,363	0,301	0,366	0,326	0,395	0,410	0,401	0,424	0,428	0,431	0,390	0,362	0,368	0,408	0,389	0,444	0,413	0,410	0,376	0,351	0,404	0,385	0,393	0,035
Hors pointe	MR73-1a	Angrignon→HB	Tête	0,356	0,401	0,395	0,442	0,421	0,368	0,453	0,388	0,396	0,395	0,397	0,435	0,402	0,392	0,383	0,426	0,458	0,437	0,423	0,400	0,413	0,402	0,413	0,386	0,428	0,451	0,411	0,028
Hors pointe	MR73-1b	HB→Angrignon	Queue	0,397	0,347	0,316	0,390	0,401	0,356	0,392	0,381	0,395	0,418	0,423	0,440	0,424	0,422	0,390	0,367	0,365	0,458	0,475	0,432	0,405	0,497	0,412	0,390	0,426	0,425	0,417	0,040
Hors pointe	MR73-1b	Angrignon→HB	Tête	0,384	0,422	0,391	0,461	0,471	0,459	0,435	0,378	0,474	0,479	0,423	0,434	0,433	0,438	0,427	0,399	0,436	0,493	0,491	0,465	0,463	0,469	0,463	0,424	0,460	0,444	0,447	0,032
Hors pointe	MR73-2a	HB→Angrignon	Queue	0,463	0,388	0,432	0,452	0,408	0,362	0,392	0,408	0,402	0,445	0,519	0,520	0,477	0,493	0,495	0,528	0,536	0,457	0,472	0,455	0,450	0,583	0,495	0,440	0,469	0,409	0,459	0,050
Hors pointe	MR73-2a	Angrignon→HB	Tête	0,432	0,626	0,533	0,455	0,448	0,449	0,432	0,339	0,436	0,531	0,548	0,516	0,507	0,492	0,403	0,511	0,466	0,452	0,466	0,572	0,485	0,419	0,423	0,442	0,472	0,526	0,479	0,066
Hors pointe	MR73-2b	HB→Angrignon	Queue	0,476	0,419	0,409	0,438	0,419	0,349	0,378	0,413	0,419	0,399	0,378	0,444	0,489	0,512	0,436	0,456	0,412	0,411	0,440	0,416	0,402	0,479	0,417	0,361	0,415	0,379	0,421	0,039
Hors pointe	MR73-2b	Angrignon→HB	Tête	0,410	0,415	0,408	0,469	0,458	0,400	0,426	0,365	0,415	0,469	0,397	0,421	0,379	0,405	0,428	0,454	0,438	0,519	0,525	0,448	0,456	0,460	0,457	0,429	0,452	0,478	0,443	0,039

0.45m/s² > a_w
0.45m/s² ≤ a_w < 0.55m/s²
0.55m/s² ≤ a_w < 0.75m/s²
0.75m/s² ≤ a_w < 0.90m/s²
0.90 m/s² < a_w

Honoré Beaugrand Rat
Râblsson Langeli
Langelier Cadi
Cadillac Assomp
Assomption Via
Viau Pie-I
Pie-IX Jolie
Jolicoeur Prefontai
Préfontaine Frontena
Frontenac Papine
Papineau Beaud
Beaudry Berri-UQA
Berri-UQAM Saint-Laur
Saint-Laurent Place-des-A
Place-des-Arts McG
McGill Pee
Peel Guy-Concord
Guy-Concordia Atwa
Atwater Lionel-Grou
Lionel-Groulx Charlevo
Charlevoix LaSa
LaSalle De l'Egli
De l'Eglise Verdu
Verdun Jolicoeur
Jolicoeur Mon
Monk Angrign

TABLEAU 5 : Accélération efficace pondérée mesurée pour chaque interstation sur la ligne 2 pour chaque condition d'essai

Description				Accélération efficace globale pondérée a_w (m/s²)																										$\bar{a}_w$	S
Charge	Motrice et état	Direction	Localisa. motrice	Interstation																											
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27		
Pointe	MR63-1a	HB→CoteVertu	Queue	0,570	0,401	0,438	0,438	0,623	0,444	0,595	0,412	0,501	0,547	0,424	0,368	0,413	0,409	0,356	0,343	0,397	0,511	0,459	0,282	0,442	0,516	0,558	0,411	0,438	0,640	0,497	0,467	0,088
Pointe	MR63-1a	CoteVertu→HB	Tête	0,306	0,421	0,377	0,313	0,354	0,389	0,346	0,282	0,403	0,346	0,441	0,338	0,389	0,428	0,429	0,329	0,428	0,457	0,556	0,442	0,367	0,456	0,401	0,456	0,349	0,527	0,480	0,411	0,067
Pointe	MR63-1b	HB→CoteVertu	Queue	0,580	0,494	0,500	0,879	0,852	0,507	0,586	0,481	0,552	0,612	0,436	0,358	0,442	0,478	0,388	0,436	0,379	0,489	0,568	0,339	0,498	0,463	0,515	0,516	0,507	0,510	0,319	0,522	0,126
Pointe	MR63-1b	CoteVertu→HB	Tête	0,593	0,534	0,820	0,491	0,726	0,435	0,399	0,434	0,655	0,356	0,513	0,417	0,469	0,641	0,486	0,430	1,026	0,605	0,919	0,677	0,674	0,616	0,429	0,756	0,440	0,708	0,458	0,620	0,173
Pointe	MR63-2a	HB→CoteVertu	Queue	0,316	0,423	0,422	0,456	0,472	0,353	0,382	0,523	0,540	0,506	0,402	0,324	0,375	0,378	0,397	0,353	0,390	0,433	0,442	0,316	0,398	0,445	0,574	0,444	0,377	0,419	0,369	0,418	0,066
Pointe	MR63-2a	CoteVertu→HB	Tête	0,385	0,513	0,439	0,432	0,531	0,510	0,441	0,350	0,400	0,311	0,462	0,352	0,406	0,476	0,461	0,398	0,632	0,427	0,466	0,446	0,445	0,464	0,406	0,365	0,345	0,404	0,414	0,439	0,067
Pointe	MR63-2b	HB→CoteVertu	Queue	0,737	0,537	0,691	0,555	0,550	0,556	0,555	0,400	0,700	0,608	0,444	0,411	0,508	0,493	0,445	0,395	0,550	0,445	0,496	0,424	0,393	0,718	0,774	0,618	0,769	0,611	0,713	0,582	0,124
Pointe	MR63-2b	CoteVertu→HB	Tête	0,481	0,566	0,476	0,747	0,423	0,586	0,462	0,408	0,762	0,510	0,516	0,386	0,457	0,587	0,512	0,675	0,616	0,485	0,782	0,936	0,663	0,749	0,483	0,971	0,565	0,739	0,425	0,631	0,163
Hors pointe	MR63-1a	HB→CoteVertu	Queue	0,358	0,359	0,511	0,440	0,408	0,[illegible]	0,385	0,397	0,562	0,569	0,362	0,310	0,357	0,352	0,401	0,355	0,391	0,336	0,355	0,232	0,345	0,395	0,389	0,392	0,374	0,532	0,466	0,402	0,077
Hors pointe	MR63-1a	CoteVertu→HB	Tête	0,416	0,413	0,366	0,324	0,285	0,[illegible]	0,264	0,275	0,413	0,297	0,423	0,315	0,367	0,428	0,385	0,274	0,342	0,351	0,385	0,447	0,311	0,374	0,325	0,530	0,380	0,455	0,487	0,380	0,068
Hors pointe	MR63-1b	HB→CoteVertu	Queue	0,501	0,425	0,450	0,838	0,623	0,[illegible]	0,464	0,468	0,698	0,567	0,425	0,358	0,386	0,380	0,377	0,318	0,511	0,483	0,503	0,321	0,558	0,498	0,456	0,476	0,321	0,554	0,345	0,486	0,122
Hors pointe	MR63-1b	CoteVertu→HB	Tête	0,399	0,547	0,534	0,403	0,391	0,402	0,393	0,311	0,518	0,332	0,448	0,359	0,374	0,465	0,526	0,452	0,665	0,748	0,661	0,745	0,455	0,711	0,374	0,611	0,873	0,493	0,693	0,543	0,153
Hors pointe	MR63-2a	HB→CoteVertu	Queue	0,413	0,420	0,408	0,371	0,448	0,370	0,421	0,459	0,589	0,501	0,442	0,313	0,359	0,412	0,438	0,408	0,438	0,342	0,383	0,377	0,355	0,322	0,401	0,447	0,539	0,443	0,344	0,418	0,063
Hors pointe	MR63-2a	CoteVertu→HB	Tête	0,389	0,571	0,563	0,419	0,370	0,406	0,417	0,357	0,492	0,348	0,449	0,347	0,376	0,455	0,441	0,424	0,390	0,410	0,341	0,361	0,356	0,393	0,382	0,421	0,431	0,374	0,439	0,418	0,059
Hors pointe	MR63-2b	HB→CoteVertu	Queue	0,615	0,511	0,707	0,588	0,533	0,484	0,441	0,424	0,894	0,679	0,523	0,539	0,531	0,420	0,388	0,458	0,636	0,582	0,529	0,437	0,473	0,502	0,414	0,517	0,643	0,604	0,968	0,570	0,138
Hors pointe	MR63-2b	CoteVertu→HB	Tête	0,432	0,586	0,520	0,544	0,403	0,435	0,643	0,383	0,575	0,462	0,644	0,415	0,452	0,456	0,453	0,478	0,512	0,402	0,672	0,805	0,511	0,487	0,469	0,509	0,399	0,964	0,569	0,563	0,136
Pointe	MR73-1a	HB→CoteVertu	Queue	0,387	0,478	0,426	0,416	0,387	0,361	0,355	0,360	0,418	0,466	0,486	0,426	0,449	0,422	0,440	0,340	0,340	0,307	0,330	0,310	0,331	0,328	0,360	0,392	0,398	0,417	0,378	0,392	0,051
Pointe	MR73-1a	CoteVertu→HB	Tête	0,403	0,455	0,418	0,429	0,358	0,345	0,366	0,346	0,407	0,384	0,404	0,396	0,393	0,405	0,445	0,384	0,435	0,402	0,395	0,411	0,414	0,413	0,443	0,438	0,375	0,468	0,432	0,410	0,032
Pointe	MR73-1b	HB→CoteVertu	Queue	0,416	0,524	0,458	0,448	0,423	0,390	0,360	0,354	0,431	0,446	0,493	0,417	0,415	0,433	0,380	0,365	0,367	0,345	0,355	0,368	0,344	0,358	0,323	0,386	0,458	0,403	0,331	0,405	0,051
Pointe	MR73-1b	CoteVertu→HB	Tête	0,418	0,499	0,386	0,440	0,452	0,451	0,399	0,335	0,427	0,425	0,446	0,401	0,452	0,462	0,477	0,396	0,438	0,424	0,421	0,427	0,452	0,376	0,361	0,407	0,434	0,493	0,415	0,431	0,038
Pointe	MR73-2a	HB→CoteVertu	Queue	0,385	0,482	0,386	0,405	0,405	0,395	0,355	0,339	0,454	0,504	0,559	0,557	0,512	0,442	0,449	0,524	0,475	0,386	0,385	0,379	0,415	0,423	0,385	0,402	0,463	0,459	0,346	0,432	0,062
Pointe	MR73-2a	CoteVertu→HB	Tête	0,496	0,548	0,528	0,401	0,370	0,367	0,388	0,385	0,454	0,468	0,511	0,440	0,530	0,569	0,513	0,460	0,490	0,444	0,434	0,439	0,430	0,488	0,464	0,408	0,369	0,459	0,448	0,458	0,056
Pointe	MR73-2b	HB→CoteVertu	Queue	0,373	0,481	0,452	0,484	0,432	0,383	0,355	0,384	0,508	0,523	0,509	0,403	0,470	0,424	0,440	0,404	0,389	0,352	0,357	0,337	0,329	0,344	0,366	0,375	0,338	0,391	0,370	0,410	0,058
Pointe	MR73-2b	CoteVertu→HB	Tête	0,419	0,572	0,415	0,438	0,429	0,414	0,486	0,456	0,423	0,386	0,459	0,424	0,423	0,457	0,493	0,460	0,441	0,386	0,448	0,416	0,408	0,440	0,481	0,438	0,454	0,423	0,476	0,446	0,038
Hors pointe	MR73-1a	HB→CoteVertu	Queue	0,422	0,465	0,337	0,354	0,381	0,361	0,354	0,350	0,396	0,416	0,470	0,404	0,396	0,377	0,339	0,361	0,359	0,338	0,351	0,343	0,339	0,336	0,359	0,327	0,326	0,372	0,340	0,372	0,039
Hors pointe	MR73-1a	CoteVertu→HB	Tête	0,412	0,488	0,391	0,377	0,381	0,397	0,407	0,323	0,384	0,379	0,430	0,423	0,402	0,408	0,430	0,371	0,410	0,412	0,396	0,405	0,419	0,346	0,363	0,391	0,376	0,447	0,428	0,403	0,033
Hors pointe	MR73-1b	HB→CoteVertu	Queue	0,345	0,430	0,353	0,379	0,434	0,418	0,387	0,354	0,395	0,412	0,456	0,381	0,403	0,400	0,367	0,328	0,353	0,313	0,364	0,351	0,369	0,354	0,400	0,392	0,327	0,375	0,341	0,378	0,035
Hors pointe	MR73-1b	CoteVertu→HB	Tête	0,398	0,492	0,442	0,375	0,346	0,386	0,460	0,387	0,404	0,369	0,422	0,444	0,428	0,436	0,449	0,413	0,411	0,383	0,427	0,405	0,388	0,445	0,447	0,425	0,352	0,459	0,486	0,421	0,037
Hors pointe	MR73-2a	HB→CoteVertu	Queue	0,578	0,628	0,441	0,472	0,454	0,395	0,337	0,331	0,462	0,494	0,506	0,386	0,423	0,489	0,518	0,450	0,440	0,456	0,442	0,373	0,419	0,365	0,354	0,359	0,336	0,407	0,367	0,441	0,075
Hors pointe	MR73-2a	CoteVertu→HB	Tête	0,512	0,657	0,581	0,448	0,387	0,452	0,455	0,403	0,434	0,401	0,537	0,473	0,499	0,606	0,546	0,483	0,432	0,406	0,447	0,410	0,400	0,425	0,508	0,490	0,412	0,508	0,630	0,486	0,075
Hors pointe	MR73-2b	HB→CoteVertu	Queue	0,393	0,520	0,402	0,394	0,397	0,357	0,358	0,351	0,409	0,446	0,507	0,412	0,465	0,459	0,440	0,366	0,398	0,320	0,419	0,399	0,362	0,356	0,362	0,334	0,314	0,369	0,312	0,398	0,054
Hors pointe	MR73-2b	CoteVertu→HB	Tête	0,462	0,542	0,438	0,387	0,357	0,403	0,436	0,353	0,387	0,416	0,491	0,381	0,461	0,492	0,504	0,421	0,414	0,374	0,379	0,382	0,406	0,402	0,401	0,384	0,364	0,410	0,461	0,422	0,049

0.45m/s² > a_w
0.45m/s² ≤ a_w < 0.55m/s²
0.55m/s² ≤ a_w < 0.75m/s²
0.75m/s² ≤ a_w < 0.90m/s²
0.90m/s² < a_w
0.90 m/s² < a_w

Henri-Bourassa, Sauvé
Sauvé, Crémazie
Crémazie, Jarry
Jarry, Jean-Talon
Jean-Talon, Beaubien
Beaubien, Rosemont
Rosemont, Laurier
Laurier, Mont-Royal
Mont-Royal, Sherbrooke
Sherbrooke, Berri-UQAM
Berri-UQAM, Champ-de-Mars
Champ-de-Mars, Place-D'Ar
Place-D'Armes, Square-Victor
Square-Victoria, Bonaventure
Bonaventure, Lucien-L'Allier
Lucien-L'Allier, Georges-Vene
Georges-Vanier, Lionel-Groulx
Lionel-Groulx, Place-Saint-Hen
Place-Saint-Henri, Vendôme
Vendôme, Villa-Maria
Villa-Maria, Snowdon
Snowdon, Côte-Sainte-Cathen
Côte-Sainte-Catherine, Plamo
Plamondon, Namur
Namur, De La Savane
De La Savane, Du Collège
Du Collège, Côte-Vertu

TABLEAU 6 : Accélération efficace pondérée mesurée pour chaque interstation sur la ligne 4 pour chaque condition d'essai

Description				Accélération efficace globale pondérée a_w (m/s²)		$\overline{a_w}$	s
Charge	Motrice et état	Direction	Localisa. motrice	Interstation 1	2		
Pointe	MR63-1a	Longueuil→Bern	Queue	0,635	0,644	0,639	0,007
Pointe	MR63-1a	Bern→Longueuil	Tête	0,556	0,476	0,520	0,057
Pointe	MR63-1b	Longueuil→Bern	Queue	0,737	0,601	0,585	0,099
Pointe	MR63-1b	Bern→Longueuil	Tête	0,972	0,724	0,868	0,178
Pointe	MR63-2a	Longueuil→Bern	Queue	0,473	0,492	0,481	0,014
Pointe	MR63-2a	Bern→Longueuil	Tête	0,614	0,529	0,577	0,060
Pointe	MR63-2b	Longueuil→Bern	Queue	0,784	0,595	0,704	0,124
Pointe	MR63-2b	Bern→Longueuil	Tête	0,795	0,515	0,679	0,201
Hors pointe	MR63-1a	Longueuil→Bern	Queue	0,439	0,393	0,422	0,034
Hors pointe	MR63-1a	Bern→Longueuil	Tête	0,491	0,452	0,474	0,028
Hors pointe	MR63-1b	Longueuil→Bern	Queue	0,738	0,742	0,740	0,003
Hors pointe	MR63-1b	Bern→Longueuil	Tête	0,704	0,567	0,643	0,098
Hors pointe	MR63-2a	Longueuil→Bern	Queue	0,539	0,526	0,534	0,010
Hors pointe	MR63-2a	Bern→Longueuil	Tête	0,609	0,444	0,537	0,117
Hors pointe	MR63-2b	Longueuil→Bern	Queue	0,592	0,510	0,562	0,060
Hors pointe	MR63-2b	Bern→Longueuil	Tête	0,854	0,699	0,788	0,111
Pointe	MR73-1a	Longueuil→Bern	Queue	0,429	0,452	0,438	0,017
Pointe	MR73-1a	Bern→Longueuil	Tête	0,510	0,408	0,464	0,072
Pointe	MR73-1b	Longueuil→Bern	Queue	0,435	0,462	0,445	0,020
Pointe	MR73-1b	Bern→Longueuil	Tête	0,483	0,446	0,466	0,027
Pointe	MR73-2a	Longueuil→Bern	Queue	0,495	0,533	0,509	0,028
Pointe	MR73-2a	Bern→Longueuil	Tête	0,544	0,598	0,570	0,038
Pointe	MR73-2b	Longueuil→Bern	Queue	0,477	0,527	0,497	0,036
Pointe	MR73-2b	Bern→Longueuil	Tête	0,530	0,506	0,519	0,017
Hors pointe	MR73-1a	Longueuil→Bern	Queue	0,441	0,425	0,435	0,012
Hors pointe	MR73-1a	Bern→Longueuil	Tête	0,471	0,443	0,458	0,020
Hors pointe	MR73-1b	Longueuil→Bern	Queue	0,424	0,449	0,433	0,018
Hors pointe	MR73-1b	Bern→Longueuil	Tête	0,487	0,423	0,457	0,045
Hors pointe	MR73-2a	Longueuil→Bern	Queue	0,485	0,519	0,498	0,024
Hors pointe	MR73-2a	Bern→Longueuil	Tête	0,603	0,488	0,550	0,081
Hors pointe	MR73-2b	Longueuil→Bern	Queue	0,476	0,507	0,488	0,023
Hors pointe	MR73-2b	Bern→Longueuil	Tête	0,495	0,438	0,468	0,040

- 0.45 m/s² > a_w
- 0.45 m/s² ≤ a_w < 0.55 m/s²
- 0.55 m/s² ≤ a_w < 0.75 m/s²
- 0.75 m/s² ≤ a_w < 0.90 m/s²
- 0.90 m/s² < a_w

0.90 m/s² < a_w

Bern-UQAM Jean-Drapeau Longueuil

TABLEAU 5 : Accélération efficace pondérée mesurée pour chaque interstation sur la ligne 2 pour chaque condition d'essai

Description				Accélération efficace globale pondérée a_w (m/s²)																									a_w	S
Charge	Motrice et état	Direction	Localisa. motrice	Interstation																										
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27		
Pointe	MR63-1a	HB →CoteVertu	Queue	0,570	0,401	0,438	0,438	0,623	0,444	0,595	0,412	0,501	0,547	0,424	0,368	0,413	0,409	0,356	0,343	0,397	0,511	0,459	0,282	0,442	0,516	0,558	0,411	0,438	0,640	0,497	0,467	0,088
Pointe	MR63-1a	CoteVertu →HB	Tête	0,306	0,421	0,377	0,313	0,354	0,389	0,346	0,282	0,403	0,346	0,441	0,338	0,389	0,428	0,429	0,329	0,428	0,457	0,556	0,442	0,367	0,456	0,401	0,456	0,349	0,527	0,480	0,411	0,067
Pointe	MR63-1b	HB →CoteVertu	Queue	0,580	0,494	0,500	0,879	0,852	0,507	0,586	0,481	0,552	0,612	0,436	0,358	0,442	0,478	0,388	0,435	0,379	0,489	0,568	0,339	0,498	0,463	0,515	0,516	0,507	0,510	0,319	0,522	0,128
Pointe	MR63-1b	CoteVertu →HB	Tête	0,593	0,534	0,820	0,491	0,726	0,435	0,399	0,434	0,655	0,356	0,513	0,417	0,469	0,641	0,486	0,430	1,026	0,605	0,919	0,677	0,674	0,616	0,429	0,756	0,440	0,708	0,458	0,620	0,173
Pointe	MR63-2a	HB →CoteVertu	Queue	0,316	0,423	0,422	0,456	0,472	0,353	0,382	0,523	0,540	0,506	0,402	0,324	0,375	0,378	0,397	0,353	0,390	0,433	0,442	0,318	0,398	0,445	0,574	0,444	0,377	0,419	0,369	0,418	0,066
Pointe	MR63-2a	CoteVertu →HB	Tête	0,385	0,513	0,439	0,432	0,531	0,510	0,441	0,350	0,400	0,311	0,462	0,352	0,406	0,476	0,461	0,398	0,632	0,427	0,466	0,446	0,445	0,464	0,406	0,365	0,345	0,404	0,414	0,439	0,067
Pointe	MR63-2b	HB →CoteVertu	Queue	0,737	0,537	0,691	0,555	0,550	0,556	0,555	0,400	0,700	0,608	0,444	0,411	0,508	0,493	0,445	0,395	0,550	0,445	0,496	0,424	0,393	0,718	0,774	0,618	0,769	0,611	0,713	0,582	0,124
Pointe	MR63-2b	CoteVertu →HB	Tête	0,481	0,566	0,476	0,747	0,423	0,586	0,462	0,408	0,762	0,510	0,516	0,386	0,457	0,587	0,512	0,675	0,616	0,485	0,782	0,936	0,663	0,749	0,483	0,971	0,565	0,739	0,425	0,631	0,163
Hors pointe	MR63-1a	HB →CoteVertu	Queue	0,358	0,359	0,511	0,440	0,408	0,336	0,385	0,397	0,562	0,569	0,362	0,310	0,357	0,352	0,401	0,355	0,391	0,336	0,355	0,232	0,345	0,395	0,389	0,392	0,374	0,532	0,468	0,402	0,077
Hors pointe	MR63-1a	CoteVertu →HB	Tête	0,416	0,413	0,366	0,324	0,286	0,316	0,294	0,275	0,413	0,297	0,423	0,315	0,367	0,428	0,385	0,274	0,342	0,351	0,385	0,447	0,311	0,374	0,325	0,530	0,380	0,455	0,487	0,380	0,068
Hors pointe	MR63-1b	HB →CoteVertu	Queue	0,501	0,425	0,450	0,838	0,623	0,361	0,464	0,468	0,698	0,567	0,425	0,358	0,386	0,380	0,377	0,318	0,511	0,483	0,503	0,321	0,558	0,498	0,456	0,476	0,321	0,554	0,345	0,486	0,122
Hors pointe	MR63-1b	CoteVertu →HB	Tête	0,389	0,547	0,534	0,403	0,391	0,402	0,393	0,311	0,518	0,332	0,448	0,359	0,374	0,465	0,526	0,452	0,665	0,748	0,661	0,745	0,455	0,711	0,374	0,611	0,873	0,493	0,693	0,543	0,153
Hors pointe	MR63-2a	HB →CoteVertu	Queue	0,413	0,420	0,408	0,371	0,448	0,370	0,421	0,459	0,589	0,501	0,442	0,313	0,359	0,412	0,438	0,408	0,438	0,342	0,383	0,377	0,355	0,322	0,401	0,447	0,539	0,443	0,344	0,418	0,083
Hors pointe	MR63-2a	CoteVertu →HB	Tête	0,389	0,571	0,563	0,419	0,370	0,406	0,417	0,357	0,492	0,348	0,449	0,347	0,376	0,455	0,441	0,424	0,390	0,410	0,341	0,361	0,356	0,393	0,362	0,421	0,431	0,374	0,436	0,418	0,059
Hors pointe	MR63-2b	HB →CoteVertu	Queue	0,615	0,511	0,707	0,588	0,533	0,484	0,441	0,424	0,894	0,679	0,523	0,539	0,531	0,420	0,368	0,458	0,636	0,582	0,529	0,437	0,473	0,502	0,414	0,517	0,643	0,604	0,969	0,570	0,138
Hors pointe	MR63-2b	CoteVertu →HB	Tête	0,432	0,586	0,520	0,544	0,403	0,435	0,643	0,383	0,575	0,462	0,644	0,415	0,452	0,456	0,453	0,478	0,512	0,402	0,672	0,805	0,511	0,487	0,469	0,509	0,399	0,954	0,569	0,563	0,136
Pointe	MR73-1a	HB →CoteVertu	Queue	0,387	0,478	0,426	0,416	0,387	0,361	0,355	0,360	0,418	0,466	0,486	0,426	0,449	0,422	0,440	0,340	0,340	0,307	0,330	0,310	0,331	0,328	0,369	0,392	0,398	0,417	0,378	0,392	0,051
Pointe	MR73-1a	CoteVertu →HB	Tête	0,403	0,455	0,418	0,429	0,358	0,345	0,386	0,346	0,407	0,384	0,404	0,396	0,399	0,406	0,445	0,384	0,435	0,402	0,395	0,411	0,414	0,413	0,443	0,438	0,375	0,468	0,432	0,410	0,032
Pointe	MR73-1b	HB →CoteVertu	Queue	0,416	0,524	0,458	0,448	0,423	0,390	0,360	0,354	0,431	0,446	0,493	0,417	0,415	0,433	0,380	0,365	0,367	0,345	0,355	0,368	0,344	0,358	0,323	0,386	0,458	0,403	0,331	0,405	0,051
Pointe	MR73-1b	CoteVertu →HB	Tête	0,418	0,499	0,386	0,440	0,452	0,451	0,399	0,335	0,427	0,425	0,448	0,401	0,452	0,462	0,477	0,396	0,438	0,424	0,421	0,427	0,452	0,378	0,361	0,407	0,434	0,493	0,415	0,431	0,038
Pointe	MR73-2a	HB →CoteVertu	Queue	0,385	0,482	0,386	0,405	0,405	0,395	0,355	0,339	0,454	0,504	0,559	0,557	0,512	0,442	0,449	0,524	0,475	0,386	0,385	0,379	0,415	0,423	0,385	0,402	0,483	0,459	0,346	0,432	0,062
Pointe	MR73-2a	CoteVertu →HB	Tête	0,496	0,548	0,528	0,401	0,370	0,367	0,388	0,385	0,454	0,468	0,511	0,440	0,530	0,569	0,513	0,460	0,490	0,444	0,434	0,439	0,430	0,488	0,464	0,408	0,369	0,459	0,448	0,466	0,056
Pointe	MR73-2b	HB →CoteVertu	Queue	0,373	0,481	0,452	0,484	0,432	0,383	0,355	0,384	0,508	0,523	0,509	0,403	0,470	0,424	0,440	0,404	0,389	0,352	0,357	0,337	0,329	0,344	0,386	0,375	0,338	0,391	0,370	0,410	0,058
Pointe	MR73-2b	CoteVertu →HB	Tête	0,419	0,572	0,415	0,438	0,429	0,414	0,466	0,456	0,423	0,386	0,459	0,424	0,423	0,457	0,493	0,460	0,441	0,386	0,448	0,418	0,408	0,440	0,481	0,438	0,454	0,423	0,476	0,446	0,038
Hors pointe	MR73-1a	HB →CoteVertu	Queue	0,422	0,465	0,337	0,354	0,381	0,361	0,354	0,350	0,396	0,416	0,470	0,404	0,396	0,377	0,339	0,361	0,359	0,338	0,351	0,343	0,339	0,336	0,359	0,327	0,325	0,372	0,340	0,372	0,039
Hors pointe	MR73-1a	CoteVertu →HB	Tête	0,412	0,488	0,391	0,377	0,361	0,397	0,407	0,323	0,384	0,379	0,430	0,423	0,402	0,408	0,430	0,371	0,410	0,412	0,396	0,405	0,419	0,346	0,363	0,391	0,376	0,447	0,428	0,403	0,033
Hors pointe	MR73-1b	HB →CoteVertu	Queue	0,345	0,430	0,353	0,379	0,434	0,418	0,387	0,354	0,395	0,412	0,456	0,381	0,403	0,400	0,367	0,328	0,353	0,313	0,384	0,351	0,369	0,354	0,400	0,392	0,327	0,375	0,341	0,378	0,035
Hors pointe	MR73-1b	CoteVertu →HB	Tête	0,398	0,492	0,442	0,375	0,346	0,386	0,460	0,397	0,404	0,369	0,422	0,444	0,428	0,438	0,449	0,413	0,411	0,393	0,427	0,405	0,388	0,445	0,447	0,425	0,352	0,459	0,486	0,421	0,037
Hors pointe	MR73-2a	HB →CoteVertu	Queue	0,578	0,628	0,441	0,472	0,454	0,395	0,337	0,331	0,462	0,494	0,506	0,366	0,423	0,489	0,518	0,450	0,440	0,456	0,442	0,373	0,419	0,365	0,354	0,359	0,336	0,407	0,367	0,441	0,075
Hors pointe	MR73-2a	CoteVertu →HB	Tête	0,512	0,657	0,581	0,448	0,387	0,452	0,455	0,403	0,434	0,401	0,537	0,473	0,499	0,606	0,546	0,483	0,432	0,406	0,447	0,410	0,400	0,425	0,508	0,490	0,412	0,508	0,630	0,486	0,075
Hors pointe	MR73-2b	HB →CoteVertu	Queue	0,393	0,520	0,402	0,394	0,397	0,357	0,358	0,351	0,409	0,446	0,507	0,412	0,465	0,459	0,440	0,366	0,398	0,320	0,419	0,399	0,362	0,356	0,362	0,334	0,314	0,369	0,312	0,398	0,054
Hors pointe	MR73-2b	CoteVertu →HB	Tête	0,462	0,542	0,438	0,387	0,357	0,403	0,438	0,353	0,387	0,416	0,491	0,381	0,461	0,492	0,504	0,421	0,414	0,374	0,379	0,382	0,406	0,402	0,401	0,384	0,384	0,410	0,461	0,422	0,049

- $0.45 m/s^2 > a_w$
- $0.45 m/s^2 \leq a_w < 0.55 m/s^2$
- $0.55 m/s^2 \leq a_w < 0.75 m/s^2$
- $0.75 m/s^2 \leq a_w < 0.90 m/s^2$
- $0.90 m/s^2 < a_w$

Henri-Bourassa Sauvé, Sauvé Crémazie, Crémazie Jarry, Jarry Jean-Talon, Jean-Talon Beaubien, Beaubien Rosemont, Rosemont Laurier, Laurier Mont-Royal, Mont-Royal Sherbrooke, Sherbrooke Berri-UQAM, Berri-UQAM Champ-de-Mars, Champ-de-Mars Place-D'Armes, Place-D'Armes Square-Victoria, Square-Victoria Bonaventure, Bonaventure Lucien-L'Allier, Lucien-L'Allier Georges-Vanier, Georges-Vanier Lionel-Groulx, Lionel-Groulx Place-Saint-Henri, Place-Saint-Henri Vendôme, Vendôme Villa-Maria, Villa-Maria Snowdon, Snowdon Côte-Sainte-Catherine, Côte-Sainte-Catherine Plamondon, Plamondon Namur, Namur De La Savane, De La Savane Du Collège, Du Collège Côte-Vertu

TABLEAU 6 : Accélération efficace pondérée mesurée pour chaque interstation sur la ligne 4 pour chaque condition d'essai

Description				Accélération efficace globale pondérée a_w (m/s²)			
Charge	Motrice et état	Direction	Localisa motrice	Interstation 1	Interstation 2	$\overline{a_w}$	S
Pointe	MR63-1a	Longueuil »Bern	Queue	0.635	0.644	0.639	0.007
Pointe	MR63-1a	Bern »Longueuil	Tête	0.556	0.476	0.520	0.057
Pointe	MR63-1b	Longueuil »Bern	Queue	0.737	0.601	0.685	0.099
Pointe	MR63-1b	Bern »Longueuil	Tête	0.872	0.724	0.866	0.178
Pointe	MR63-2a	Longueuil »Bern	Queue	0.473	0.492	0.481	0.014
Pointe	MR63-2a	Bern »Longueuil	Tête	0.614	0.529	0.577	0.060
Pointe	MR63-2b	Longueuil »Bern	Queue	0.764	0.595	0.704	0.124
Pointe	MR63-2b	Bern »Longueuil	Tête	0.795	0.515	0.679	0.201
Hors pointe	MR63-1a	Longueuil »Bern	Queue	0.439	0.393	0.422	0.034
Hors pointe	MR63-1a	Bern »Longueuil	Tête	0.491	0.452	0.474	0.028
Hors pointe	MR63-1b	Longueuil »Bern	Queue	0.738	0.742	0.740	0.003
Hors pointe	MR63-1b	Bern »Longueuil	Tête	0.704	0.567	0.643	0.098
Hors pointe	MR63-2a	Longueuil »Bern	Queue	0.539	0.526	0.534	0.010
Hors pointe	MR63-2a	Bern »Longueuil	Tête	0.609	0.444	0.537	0.117
Hors pointe	MR63-2b	Longueuil »Bern	Queue	0.592	0.510	0.562	0.060
Hors pointe	MR63-2b	Bern »Longueuil	Tête	0.854	0.699	0.788	0.111
Pointe	MR73-1a	Longueuil »Bern	Queue	0.429	0.452	0.438	0.017
Pointe	MR73-1a	Bern »Longueuil	Tête	0.510	0.408	0.464	0.072
Pointe	MR73-1b	Longueuil »Bern	Queue	0.435	0.462	0.445	0.020
Pointe	MR73-1b	Bern »Longueuil	Tête	0.483	0.446	0.466	0.027
Pointe	MR73-2a	Longueuil »Bern	Queue	0.495	0.533	0.509	0.026
Pointe	MR73-2a	Bern »Longueuil	Tête	0.544	0.598	0.570	0.038
Pointe	MR73-2b	Longueuil »Bern	Queue	0.477	0.527	0.497	0.036
Pointe	MR73-2b	Bern »Longueuil	Tête	0.530	0.506	0.519	0.017
Hors pointe	MR73-1a	Longueuil »Bern	Queue	0.441	0.425	0.435	0.012
Hors pointe	MR73-1a	Bern »Longueuil	Tête	0.471	0.443	0.458	0.020
Hors pointe	MR73-1b	Longueuil »Bern	Queue	0.424	0.449	0.433	0.018
Hors pointe	MR73-1b	Bern »Longueuil	Tête	0.487	0.423	0.457	0.045
Hors pointe	MR73-2a	Longueuil »Bern	Queue	0.485	0.519	0.498	0.024
Hors pointe	MR73-2a	Bern »Longueuil	Tête	0.603	0.488	0.550	0.081
Hors pointe	MR73-2b	Longueuil »Bern	Queue	0.476	0.507	0.488	0.023
Hors pointe	MR73-2b	Bern »Longueuil	Tête	0.495	0.438	0.466	0.040

- 0.45 m/s² > a_w
- 0.45 m/s² ≤ a_w < 0.55 m/s²
- 0.55 m/s² ≤ a_w < 0.75 m/s²
- 0.75 m/s² ≤ a_w < 0.90 m/s²
- 0.90 m/s² < a_w

0.90 m/s² < a_w

Bern UQAM Jean Drapeau Longueuil

TABLEAU 7 : Accélération efficace pondérée mesurée pour chaque interstation sur la ligne 5 pour chaque condition d'essai

Description				Accélération efficace globale pondérée a_w (m/s²)											a_w	S
Charge	Motrice et état	Direction	Localisation motrice	Interstation												
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
Pointe	MR63-1a	Snowdon→St	Queue	0,267	0,561	0,482	0,431	0,398	0,430	0,376	0,593	0,611	0,425	0,235	0,441	0,121
Pointe	MR63-1a	St.→Snowdon	Tête	0,383	0,314	0,297	0,368	0,299	0,426	0,403	0,289	0,311	0,330	0,355	0,347	0,047
Pointe	MR63-1b	Snowdon→St	Queue	0,274	0,428	0,536	0,766	0,535	0,459	0,384	0,505	0,639	0,633	0,342	0,516	0,145
Pointe	MR63-1b	St.→Snowdon	Tête	0,709	0,464	0,462	0,422	0,324	0,480	0,517	0,385	0,593	0,568	0,376	0,499	0,112
Pointe	MR63-2a	Snowdon→St	Queue	0,400	0,429	0,400	0,618	0,600	0,474	0,408	0,578	0,458	0,577	0,309	0,479	0,101
Pointe	MR63-2a	St.→Snowdon	Tête	0,458	0,315	0,331	0,406	0,312	0,404	0,429	0,324	0,426	0,363	0,268	0,375	0,062
Pointe	MR63-2b	Snowdon→St	Queue	0,308	0,558	0,702	**0,997**	0,517	0,449	0,399	0,579	**0,965**	0,614	0,338	0,625	0,233
Pointe	MR63-2b	St.→Snowdon	Tête	0,492	0,578	0,469	0,489	0,368	0,449	0,479	0,406	0,498	0,461	0,396	0,468	0,058
Hors pointe	MR63-1a	Snowdon→St	Queue	0,207	0,307	0,409	0,556	0,286	0,340	0,335	0,442	0,471	0,445	0,237	0,378	0,108
Hors pointe	MR63-1a	St.→Snowdon	Tête	0,315	0,267	0,328	0,383	0,221	0,366	0,411	0,344	0,317	0,331	0,360	0,334	0,053
Hors pointe	MR63-1b	Snowdon→St	Queue	0,323	0,470	0,849	0,707	**0,930**	0,710	0,358	0,495	0,463	0,368	0,241	0,542	0,208
Hors pointe	MR63-1b	St.→Snowdon	Tête	0,497	0,563	0,417	0,400	0,322	0,503	0,414	0,330	0,552	0,427	0,420	0,452	0,081
Hors pointe	MR63-2a	Snowdon→St	Queue	0,309	0,426	0,504	0,413	0,384	0,318	0,336	0,411	0,420	0,545	0,318	0,400	0,077
Hors pointe	MR63-2a	St.→Snowdon	Tête	0,364	0,361	0,377	0,432	0,284	0,353	0,393	0,323	0,378	0,360	0,391	0,369	0,039
Hors pointe	MR63-2b	Snowdon→St	Queue	0,301	0,462	0,646	0,677	0,657	0,540	0,290	0,368	0,391	0,366	0,398	0,483	0,145
Hors pointe	MR63-2b	St.→Snowdon	Tête	0,692	0,497	0,432	0,531	0,422	0,681	0,450	0,381	0,467	0,610	0,413	0,527	0,111
Pointe	MR73-1a	Snowdon→St	Queue	0,334	0,372	0,401	0,375	0,326	0,396	0,411	0,413	0,388	0,396	0,334	0,375	0,032
Pointe	MR73-1a	St.→Snowdon	Tête	0,473	0,340	0,354	0,465	0,385	0,407	0,410	0,354	0,425	0,410	0,435	0,411	0,044
Pointe	MR73-1b	Snowdon→St	Queue	0,303	0,438	0,402	0,381	0,381	0,323	0,334	0,344	0,367	0,382	0,323	0,362	0,040
Pointe	MR73-1b	St.→Snowdon	Tête	0,437	0,407	0,379	0,424	0,366	0,361	0,363	0,330	0,412	0,393	0,394	0,392	0,032
Pointe	MR73-2a	Snowdon→St	Queue	0,347	0,399	0,368	0,383	0,295	0,413	0,424	0,433	0,467	0,456	0,389	0,399	0,050
Pointe	MR73-2a	St.→Snowdon	Tête	0,367	0,348	0,335	0,423	0,336	0,397	0,458	0,399	0,482	0,429	0,380	0,399	0,049
Pointe	MR73-2b	Snowdon→St	Queue	0,420	0,354	0,310	0,390	0,411	0,413	0,370	0,384	0,440	0,503	0,350	0,398	0,052
Pointe	MR73-2b	St.→Snowdon	Tête	0,438	0,439	0,334	0,401	0,350	0,363	0,366	0,329	0,420	0,364	0,380	0,385	0,040
Hors pointe	MR73-1a	Snowdon→St	Queue	0,273	0,319	0,326	0,438	0,285	0,322	0,298	0,327	0,334	0,348	0,281	0,327	0,045
Hors pointe	MR73-1a	St.→Snowdon	Tête	0,408	0,337	0,324	0,411	0,286	0,356	0,371	0,277	0,388	0,359	0,376	0,361	0,045
Hors pointe	MR73-1b	Snowdon→St	Queue	0,319	0,365	0,357	0,396	0,360	0,340	0,314	0,349	0,376	0,386	0,313	0,354	0,029
Hors pointe	MR73-1b	St.→Snowdon	Tête	0,437	0,411	0,359	0,402	0,332	0,384	0,409	0,373	0,358	0,395	0,421	0,390	0,031
Hors pointe	MR73-2a	Snowdon→St	Queue	0,391	0,392	0,318	0,347	0,343	0,336	0,345	0,375	0,414	0,375	0,343	0,364	0,030
Hors pointe	MR73-2a	St.→Snowdon	Tête	0,496	0,345	0,385	0,427	0,323	0,340	0,405	0,321	0,409	0,487	0,491	0,410	0,067
Hors pointe	MR73-2b	Snowdon→St	Queue	0,298	0,397	0,401	0,433	0,341	0,375	0,419	0,457	0,524	0,408	0,312	0,399	0,065
Hors pointe	MR73-2b	St.→Snowdon	Tête	0,359	0,353	0,402	0,430	0,318	0,360	0,422	0,371	0,367	0,399	0,357	0,378	0,034

- 0.45m/s² > a_w
- 0.45m/s² ≤ a_w < 0.55m/s²
- 0.55m/s² ≤ a_w < 0.75m/s²
- 0.75m/s² ≤ a_w < 0.90m/s²
- 0.90m/s² < a_w

Snowdon, Côte-des-Neiges, Côte-des-Neiges, Université de Montréal, Edoua, Édouard-Montpetit, Outremont, Outremont, Acadie, Acadie, Parc, Parc De Castelnau, De Castelnau, Jean-Talon, Jean-Talon, Fabre, Fabre, D'Iberville, D'Iberville, Saint-Michel

TABLEAU 7 : Accélération efficace pondérée mesurée pour chaque interstation sur la ligne 5 pour chaque condition d'essai

Description				Accélération efficace globale pondérée a_w (m/s²)											$\bar{a}_w$	s
Charge	Motrice et état	Direction	Localisa. motrice	Interstation												
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
Pointe	MR63-1a	Snowdon→St	Queue	0,287	0,561	0,482	0,431	0,398	0,430	0,378	0,593	0,611	0,425	0,236	0,441	0,121
Pointe	MR63-1a	St→Snowdon	Tête	0,383	0,314	0,297	0,386	0,299	0,426	0,403	0,289	0,311	0,330	0,355	0,347	0,047
Pointe	MR63-1b	Snowdon→St	Queue	0,274	0,428	0,536	0,766	0,535	0,459	0,384	0,505	0,639	0,633	0,342	0,516	0,145
Pointe	MR63-1b	St→Snowdon	Tête	0,709	0,464	0,462	0,422	0,324	0,480	0,517	0,365	0,593	0,568	0,376	0,499	0,112
Pointe	MR63-2a	Snowdon→St	Queue	0,400	0,429	0,400	0,618	0,600	0,474	0,408	0,578	0,458	0,577	0,309	0,479	0,101
Pointe	MR63-2a	St→Snowdon	Tête	0,458	0,315	0,331	0,406	0,312	0,404	0,429	0,324	0,426	0,363	0,268	0,375	0,062
Pointe	MR63-2b	Snowdon→St	Queue	0,308	0,558	0,702	0,997	0,517	0,449	0,398	0,579	0,965	0,614	0,338	0,625	0,233
Pointe	MR63-2b	St→Snowdon	Tête	0,492	0,578	0,469	0,489	0,368	0,449	0,479	0,408	0,498	0,461	0,396	0,468	0,058
Hors pointe	MR63-1a	Snowdon→St	Queue	0,207	0,307	0,409	0,556	0,286	0,340	0,335	0,442	0,471	0,445	0,237	0,378	0,108
Hors pointe	MR63-1a	St→Snowdon	Tête	0,316	0,267	0,328	0,383	0,221	0,366	0,411	0,344	0,317	0,331	0,360	0,334	0,053
Hors pointe	MR63-1b	Snowdon→St	Queue	0,323	0,470	0,849	0,707	0,930	0,710	0,358	0,495	0,463	0,366	0,241	0,542	0,208
Hors pointe	MR63-1b	St→Snowdon	Tête	0,497	0,563	0,417	0,400	0,322	0,503	0,414	0,330	0,552	0,427	0,420	0,452	0,081
Hors pointe	MR63-2a	Snowdon→St	Queue	0,306	0,428	0,504	0,413	0,384	0,318	0,336	0,411	0,420	0,545	0,318	0,400	0,077
Hors pointe	MR63-2a	St→Snowdon	Tête	0,364	0,361	0,377	0,432	0,284	0,353	0,393	0,323	0,378	0,360	0,391	0,369	0,039
Hors pointe	MR63-2b	Snowdon→St	Queue	0,301	0,462	0,846	0,877	0,657	0,540	0,290	0,368	0,391	0,366	0,398	0,483	0,145
Hors pointe	MR63-2b	St→Snowdon	Tête	0,682	0,497	0,432	0,531	0,422	0,681	0,450	0,381	0,467	0,610	0,413	0,527	0,111
Pointe	MR73-1a	Snowdon→St	Queue	0,334	0,372	0,401	0,375	0,326	0,396	0,411	0,413	0,386	0,396	0,334	0,375	0,032
Pointe	MR73-1a	St→Snowdon	Tête	0,473	0,340	0,354	0,465	0,385	0,407	0,410	0,354	0,425	0,410	0,435	0,411	0,044
Pointe	MR73-1b	Snowdon→St	Queue	0,303	0,438	0,402	0,381	0,361	0,323	0,334	0,344	0,367	0,382	0,321	0,362	0,040
Pointe	MR73-1b	St→Snowdon	Tête	0,437	0,407	0,379	0,424	0,396	0,361	0,363	0,330	0,412	0,383	0,394	0,392	0,032
Pointe	MR73-2a	Snowdon→St	Queue	0,347	0,399	0,368	0,383	0,295	0,413	0,424	0,433	0,467	0,456	0,388	0,399	0,050
Pointe	MR73-2a	St→Snowdon	Tête	0,367	0,348	0,335	0,423	0,336	0,397	0,458	0,398	0,482	0,429	0,393	0,399	0,049
Pointe	MR73-2b	Snowdon→St	Queue	0,420	0,364	0,310	0,390	0,411	0,413	0,370	0,384	0,440	0,503	0,383	0,398	0,052
Pointe	MR73-2b	St→Snowdon	Tête	0,436	0,439	0,334	0,401	0,350	0,383	0,396	0,329	0,420	0,364	0,360	0,385	0,040
Hors pointe	MR73-1a	Snowdon→St	Queue	0,273	0,319	0,326	0,438	0,286	0,322	0,290	0,327	0,334	0,348	0,281	0,327	0,045
Hors pointe	MR73-1a	St→Snowdon	Tête	0,406	0,337	0,324	0,411	0,286	0,386	0,371	0,277	0,388	0,369	0,378	0,361	0,045
Hors pointe	MR73-1b	Snowdon→St	Queue	0,318	0,385	0,357	0,396	0,360	0,340	0,314	0,349	0,376	0,386	0,313	0,354	0,029
Hors pointe	MR73-1b	St→Snowdon	Tête	0,437	0,411	0,369	0,402	0,332	0,384	0,406	0,373	0,358	0,398	0,421	0,388	0,031
Hors pointe	MR73-2a	Snowdon→St	Queue	0,391	0,392	0,318	0,347	0,343	0,336	0,345	0,375	0,414	0,375	0,343	0,364	0,030
Hors pointe	MR73-2a	St→Snowdon	Tête	0,496	0,345	0,385	0,427	0,323	0,340	0,405	0,321	0,409	0,487	0,491	0,410	0,067
Hors pointe	MR73-2b	Snowdon→St	Queue	0,296	0,397	0,401	0,433	0,341	0,375	0,416	0,457	0,524	0,408	0,312	0,398	0,065
Hors pointe	MR73-2b	St→Snowdon	Tête	0,359	0,353	0,402	0,430	0,318	0,360	0,422	0,371	0,367	0,399	0,367	0,378	0,034

0.45m/s² > a_w
0.45m/s² ≤ a_w < 0.55m/s²
0.55m/s² ≤ a_w < 0.75m/s²
0.75m/s² ≤ a_w < 0.90m/s²
0.90m/s² < a_w

Snowdon, Côte-des-Neiges
Côte-des-Neiges, Université-d
Université-de-Montréal, Édoua
Édouard-Montpetit, Outremont
Outremont, Acadie
Acadie, Parc
Parc, De Castelneau
De Castelneau, Jean-Talon
Jean-Talon, Fabre
Fabre, D'Iberville
D'Iberville, Saint-Michel

lignes 1 et 2, il s'agit de la moyenne de 8 valeurs établies pour chaque demi-parcours, soit 4 motrices x 2 lignes. Pour les motrices MR-63 sur les lignes 1 et 2, une distinction est faite entre celles étant munies de pneus neufs (MR-63a) et celles étant munies de pneus usagés, lesquels comportaient une ovalisation hors-tolérance (MR-63b). Les moyennes sont donc établies sur la base de quatre valeurs pour ces dernières. Pour les lignes 4 et 5, les moyennes sont établies sur la base de 4 et de 2 valeurs respectivement pour les MR-73 et MR-63.

TABLEAU 8 : Accélération efficace pondérée moyenne établie en direction verticale pour chaque ligne de métro pour les types de motrices indiquées

Motrice	$a_{wz,\ siège}$ (ms^{-2})		
	Lignes 1 et 2	Ligne 4	Ligne 5
MR 63-a	0,44 ± 0,03	0,52 ± 0,01	0,40 ± 0,02
MR 63-b	0,57 ± 0,04	0,71 ± 0,04	0,51 ± 0,01
MR 73*	0,42 ± 0,02	0,48 ± 0,04	0,38 ± 0,02

Les résultats présentés dans le tableau 8 démontrent que les niveaux d'exposition sont similaires pour les motrices MR-73 et MR-63-a, mais qu'ils sont passablement plus élevés pour les motrices MR-63-b munies de pneus pour lesquels l'ovalisation est hors-tolérance. Aussi, des différences importantes des niveaux sont mises en évidence entre les différentes lignes de métro.

4.1.1 Caractéristiques spectrales des vibrations verticales au siège

Sur le plan des caractéristiques spectrales des accélérations vibratoires pondérées mesurées sur les sièges en direction verticale, les résultats démontrent une prédominance des vibrations dans la bande de fréquence de tiers d'octave centrée à 2,5 ou 3,2 Hz pour les motrices MR-73, tandis que deux pics très distincts apparaissent dans les spectres moyens des motrices MR-63 situés à 2 Hz et à 6,3 Hz, cette dernière composante étant prédominante dans la majorité des situations. La composante à 6,3 Hz apparaît de façon occasionnelle dans les spectres vibratoires des motrices MR-73 mais de façon beaucoup moins marquée que pour les motrices MR-63.

La figure 4 présente les spectres en fréquences moyens des accélérations pondérées mesurées sur le siège en direction verticale pour les différents types de motrices circulant sur les différentes lignes de métro. Ces résultats illustrent clairement la différence des caractéristiques spectrales vibratoires des motrices MR-63 et MR-73.

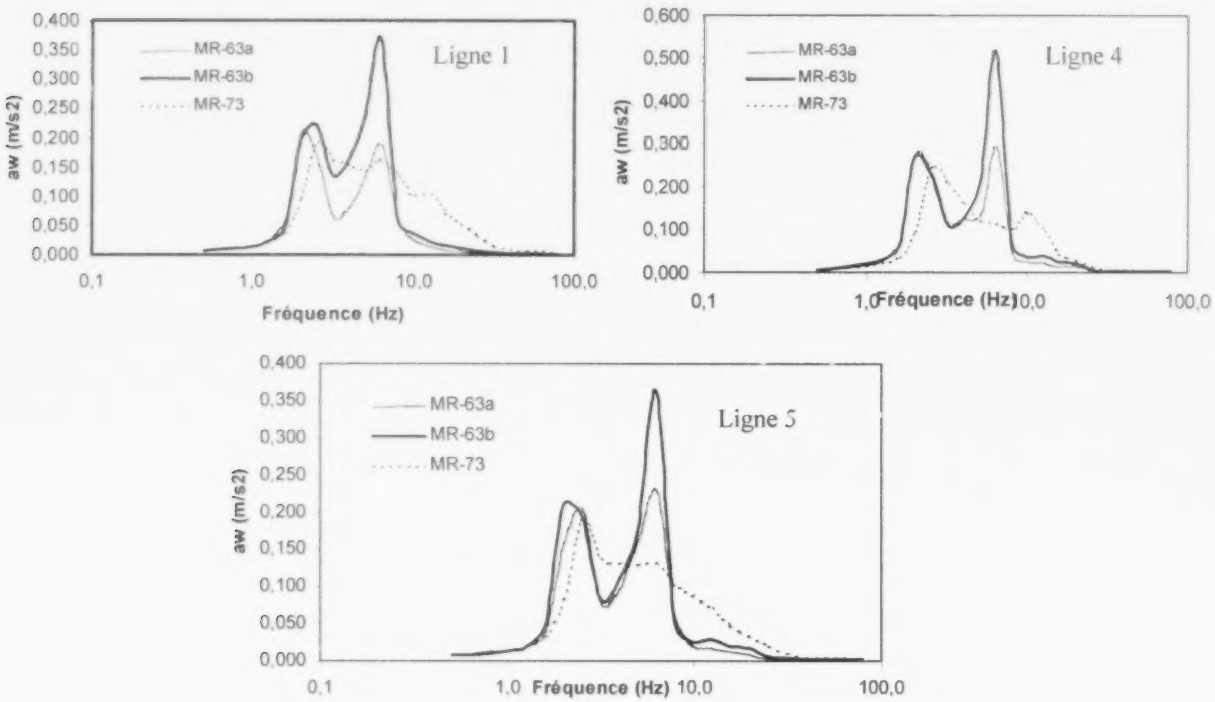


Figure 4 : Spectres moyens en bandes de fréquences de tiers d'octave des accélérations pondérées mesurées sur le siège en direction verticale pour les différentes motrices et ligne du métro

4.2 Caractérisation de l'exposition vibratoire dans les directions transversales et au dossier

Dans les directions transversales (x-siège et y-siège) ainsi qu'au dossier (x-dossier), les résultats apparaissant dans les tableaux 2 et 3 démontrent que :

1. les niveaux de l'accélération efficace pondérée (pondération W_d pour x et y-siège, W_c pour x-dossier) sont beaucoup plus faibles qu'en direction verticale;

2. les niveaux ne varient pas selon les différentes lignes de métro;

3. les variations entre les interstations sont très faibles;

4. la seule différence entre les motrices MR-63 et MR-73 apparaît pour les vibrations mesurées selon l'axe x-dossier pour lesquelles le niveau de l'accélération efficace pondérée est beaucoup plus important pour les MR-63 que pour les MR-73.

Le tableau 9 présente un sommaire des niveaux moyens de l'accélération efficace pondérée mesurés dans les directions transversales ainsi qu'au dossier pour chaque type de motrice. Pour chaque motrice et condition d'essai, les valeurs moyennes apparaissant dans le tableau 9 sont calculées en faisant la moyenne de huit valeurs chacune pour les motrices MR-63a et MR-63b (4 lignes x 2 conditions d'entretien) et de 16 valeurs pour les motrices MR-73. Ces valeurs sont tirées des tableaux 2 et 3 pour les axes x-siège, y-siège et x-dossier.

TABLEAU 9 : Accélération efficace pondérée moyenne établie dans les directions transversales pour les types de motrices indiquées

Motrice	$a_{wx,\,siège}$ (ms^{-2})	$a_{wy,\,siège}$ (ms^{-2})	$a_{wx,\,dossier}$ (ms^{-2})
MR 63-a	0,09 ± 0,01	0,18 ± 0,01	0,30 ± 0,04
MR 63-b	0,10 ± 0,01	0,18 ± 0,01	0,34 ± 0,05
MR 73*	0,08 ± 0,01	0,18 ± 0,02	0,18 ± 0,02

*moyenne de 16 valeurs

Les analyses spectrales réalisées pour les vibrations mesurées selon les axes x-siège, y-siège et x-dossier démontrent que :

1. les vibrations selon l'axe x-siège sont dominantes dans la bande de fréquence de tiers d'octave centrée à 2,0, 2,5 ou 3,2 Hz pour l'ensemble des motrices;

2. les vibrations selon l'axe y-siège sont dominantes dans la bande de fréquence de tiers d'octave centrée à 2,0 Hz pour l'ensemble des motrices;

3. les vibrations selon l'axe x-dossier sont dominantes aux fréquences centrées à 2,5 ou 3,2 Hz pour les motrices MR-73 et à 6,3 Hz pour les MR-63.

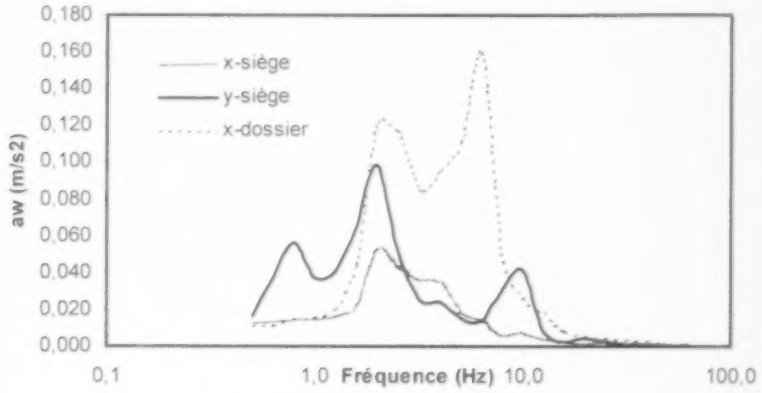


Figure 5 : Spectres en fréquences des vibrations transversales mesurées sur le siège d'une motrice MR-63

4.3 Évaluation de la dose d'exposition vibratoire pour les opérateurs du métro de Montréal

Selon les données fournies sur la répartition du temps de travail des opérateurs du métro de Montréal, il est estimé que la durée d'exposition quotidienne moyenne pourrait être de l'ordre de 5,3 heures. Ceci repose sur l'estimation qui a pu être faite sur la ligne 1 que la proportion du temps pendant lequel le train est en mouvement pour chaque demi parcours est de l'ordre de 70 %. Considérant que la durée maximale de l'assignation dans une journée de travail est de 7,5 heures, il est estimé que le train pourrait être mouvement et soumettre l'opérateur à des vibrations pendant 5,3 heures au cours d'une journée de travail. La norme ISO 2631-1:1997 fixe à 0,45 ms^{-2} le niveau d'accélération équivalent 8 heures A(8) qui marque le début de la zone de précaution santé, tandis que la limite d'exposition est établie à environ 0,90 ms^{-2}. En retenant les niveaux d'exposition les plus importants mesurés sur la ligne 4 (voir tableau 8), le calcul de la valeur A(8) peut être effectué pour le cas impliquant une durée d'exposition quotidienne moyenne de 5,3 heures. Le tableau 10 présente un résumé des valeurs A(8) résultant d'un tel calcul. Celles-ci indiquent que les doses d'exposition vibratoire se situeraient en dessous et à proximité de la zone de précaution santé dans la majorité des situations impliquant les motrices MR-73, tandis que selon le type de pneus utilisés, les doses vibratoires pourraient se situer à l'intérieur de la zone de précaution santé pour les motrices MR-63.

De toute évidence, la composante vibratoire apparaissant à la fréquence de 6,3 Hz constitue un élément de préoccupation pour les motrices MR-63 puisqu'elle se situe dans la plage de fréquence de sensibilité maximale pour le corps humain. Il convient de retenir que lorsque les sollicitations sont transmises à cette fréquence, l'inconfort ressenti par les opérateurs pourrait être considérable en raison de la sollicitation vibratoire apparaissant à proximité de la fréquence naturelle du corps humain.

TABLEAU 10 : Caractérisation des valeurs d'accélération efficace équivalente 8 heures pour les valeurs a_w indiquées (doses vibratoires calculées pour une durée d'exposition quotidienne de 5,3 heures)

a_w (ms^{-2})	A(8) (ms^{-2})
0,43	0,35
0,51	0,42
0,71	0,58

4.4 Influence de la vitesse sur les niveaux d'exposition vibratoire

Les tableaux 4 à 7 démontrent que les niveaux d'exposition vibratoire en direction verticale peuvent varier de façon importante pour différentes interstations. Ces variations peuvent atteindre 100 % et plus dans certains cas. Dans le but d'évaluer l'influence de la vitesse sur les niveaux d'exposition vibratoire, la figure 6 présente trois situations impliquant différentes motrices opérant sur des lignes de métro différentes, et pour chaque situation, concentre sur deux interstations présentant des différences importantes sur les niveaux mesurés. En particulier, la figure présente l'évolution des accélération efficace pondérée (valeurs moyennes 1 seconde) en fonction de la vitesse de déplacement des motrices sur toute la durée du trajet. La partie gauche de la figure 6 présente l'évolution des accélérations efficaces pour un demi-trajet (du repos au point où la vitesse commence à diminuer) tandis que la partie droite présente l'évolution de la vitesse et de l'accélération efficace pondérée en fonction du temps de trajet pour parcourir toute l'interstation.

Les résultats présentés dans la figure 6 démontrent de façon générale une tendance à ce que les niveaux d'exposition augmentent en fonction de la vitesse de déplacement des motrices, mais de façon plus évidente lorsque la vitesse passe au-delà de 60 km/h. En effet, les graphiques de droite dans la figure 6 démontrent que lorsque la vitesse excède 60 km/h et qu'elle est maintenue à ce niveau pendant une période de temps plus longue, les accélérations vibratoires ont tendance à augmenter de façon très marquée. Ainsi, les interstations présentant une distance de parcours plus grande sont plus susceptibles de présenter des niveaux vibratoires élevés, en permettant d'atteindre et de maintenir des vitesses plus importantes sur une plus longue période de temps. C'est le cas notamment des deux interstations constituant la ligne 4 pour lesquelles la durée de trajet varie entre 135 et 160 s et qui présentent les niveaux d'exposition parmi les plus élevés.

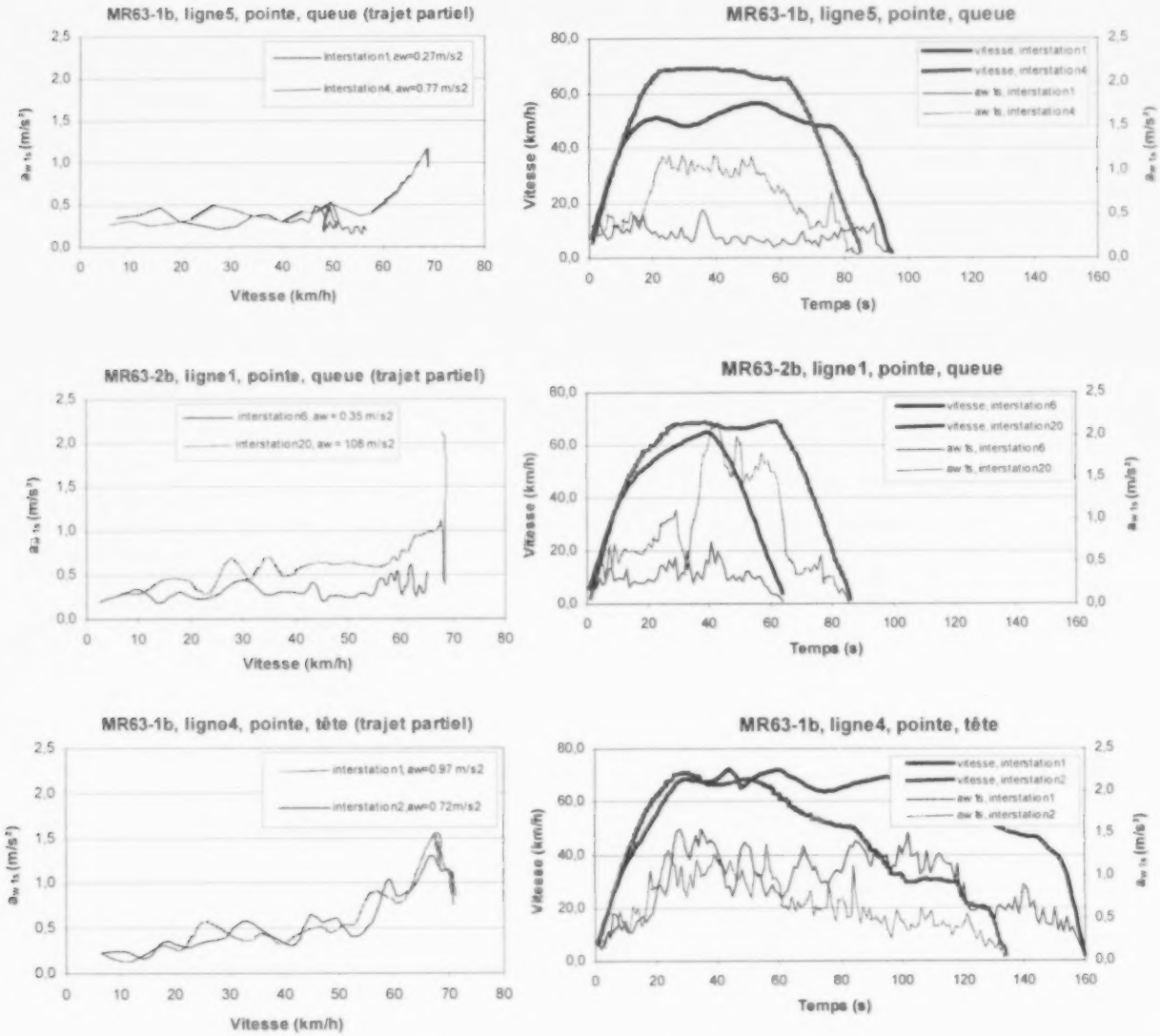


Figure 6 : Influence de la vitesse de déplacement des motrices sur les niveaux d'accélération efficace pondérée pour différentes motrices opérant sur les interstations indiquées

La composante fréquentielle apparaissant à 6 Hz peut être liée à la vitesse de rotation des pneus. Considérant que les pneus ont un rayon moyen de 45,7 cm (18 pouces), la composante en fréquence apparaissant à 6 Hz pourrait être sollicitée dès que la vitesse atteint 61 km/h. Ainsi, dépendamment de l'ovalisation des pneus, toute vitesse atteignant et excédant 61 km/h pourrait favoriser la sollicitation plus ou moins importante des modes vibratoires se situant à proximité de 6 Hz. Cette fréquence correspond d'ailleurs au mode de vibration verticale des bogies.

Par ailleurs, la vitesse à elle seule ne peut expliquer uniquement les différences des niveaux vibratoires qui ont été mesurés. L'influence de la vitesse sur les niveaux de vibrations mesurés semble varier selon le type de motrice impliqué. À titre d'exemple, la figure 7 présente le lien qui a pu être établi entre la vitesse et l'accélération efficace pondérée pour différentes motrices opérant dans les mêmes conditions sur le parcours d'une même interstation. Pour les cinq motrices impliquées, la durée du trajet a varié entre 82 s (MR63-2a) et 85.5 s (MR63-1b). Dans tous les cas, le profil de vitesse était similaire mais l'évolution des accélérations efficaces pondérées affichait des différences importantes selon le type de motrice impliqué. Par exemple, les niveaux ont rarement excédé 0,5 ms^{-2} pour les motrices MR73-1a et MR63-1a, mais à des vitesses identiques de l'ordre de 70 km/h, les niveaux ont pu osciller autour de 1,5 ms^{-2} pour la motrice MR63-2b. Ainsi, les motrices MR63-1b et MR63-2b (celles présentant une ovalisation hors-tolérance) ont présenté les niveaux les plus élevés sur l'interstation impliquée, se situant à plus du double des niveaux mesurés avec la motrice MR73-1a.

Enfin, la figure 8 présente les spectres en fréquence en bandes de tiers d'octave des vibrations verticales mesurées au siège pour chacune des cinq motrices opérant sur le parcours de l'interstation pour laquelle les résultats de la figure 7 ont été présentés. Ces spectres démontrent que plus la composante à 6,3 Hz est d'intensité importante, plus les niveaux de l'accélération efficace pondérée sont élevés. Cette composante en fréquence est d'ailleurs seulement mise en évidence davantage pour les motrices MR-63, mais de façon encore plus marquée pour les deux motrices présentant une ovalisation hors-tolérance (MR63-1b, MR63-2b) et pour la motrice MR63-2a. Les motrices MR-63 présentent deux fréquences dominantes apparaissant dans les bandes de fréquence de tiers d'octave centrées à 2,5 Hz et 6,3 Hz, cette dernière étant la plus importante pour les deux motrices présentant une ovalisation hors-tolérance. Quant à la motrice MR-73 qui présente le niveau vibratoire le plus faible, la composante dominante apparaît dans la bande centrée à 3,2 Hz tandis que celle à 6,3 Hz peut tout juste être distinguée. Ainsi, on peut conclure que toute condition favorisant la production d'une composante fréquentielle importante à 6,3 Hz est susceptible d'engendrer des niveaux accrus d'exposition aux vibrations. Ces conditions sont d'autant plus préoccupantes que cette fréquence se situe dans la zone de sensibilité maximale du corps humain aux vibrations. Une ovalisation hors-tolérance des pneus favoriserait donc un accroissement des niveaux vibratoires à cette fréquence.

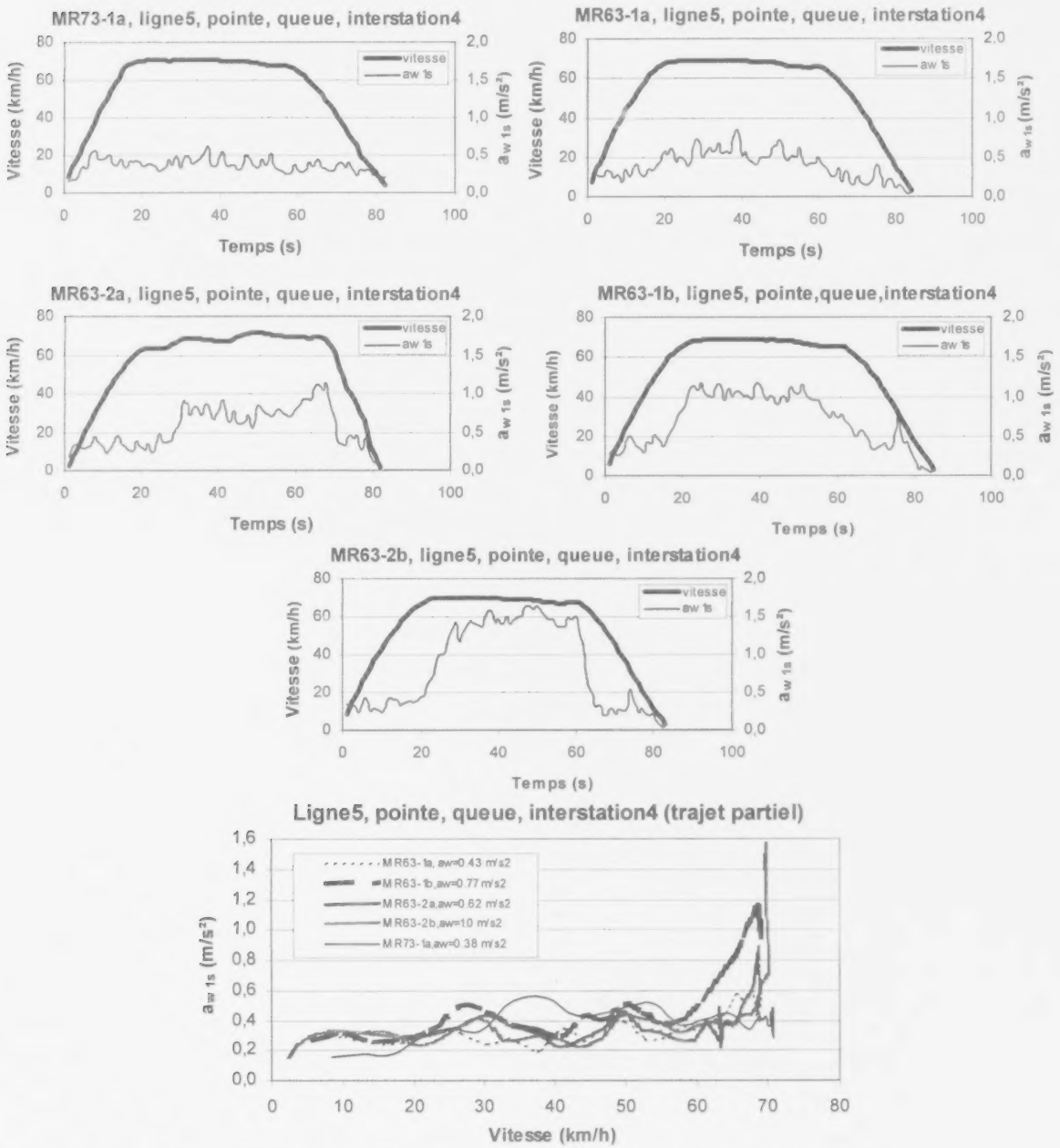


Figure 7 : Influence de la vitesse sur les accélérations efficaces pondérées pour différentes motrices opérant sur une même interstation

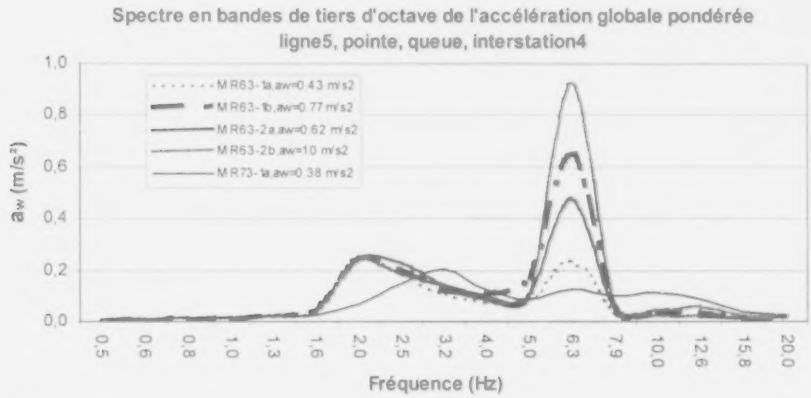


Figure 8 : Spectres en fréquence en bandes de tiers d'octave des vibrations verticales au siège de différentes motrices opérant sur la même interstation dans des conditions identiques

4.5 Évaluation de l'efficacité des strapontins

Les résultats présentés dans les tableaux 2 et 3 démontrent que de façon générale pour les motrices MR-63 et MR-73, le facteur SEAT est égal ou supérieur à 1,0, indiquant ainsi que les strapontins utilisés agissent comme des transmetteurs, voire même des amplificateurs de vibrations. Il importe de souligner que les strapontins n'ont, de base, pas été conçus dans le but spécifique d'atténuer les vibrations. La figure 9 illustre les courbes de transmissibilité des strapontins dans différentes motrices opérant sur la ligne 4. Ces résultats démontrent qu'il n'y a pas d'atténuation produite par les strapontins à des fréquences inférieures à 5 Hz , mais plutôt une amplification. Par ailleurs, très peu d'atténuation apparaît au delà de 5 Hz et pour la motrice MR63-1a, cette atténuation survient seulement au delà de 10 Hz. Par ailleurs l'amplification maximale produite par les strapontins apparaît à proximité de 5 Hz qui constitue la fréquence de sensibilité maximale du corps humain aux vibrations. Pour être efficace, le siège aurait avantage à réduire de façon importante les vibrations transmises à la fréquence de 6,3 Hz, qui constitue la fréquence dominante dans plusieurs situations, particulièrement lorsque les motrices MR-63 sont impliquées.

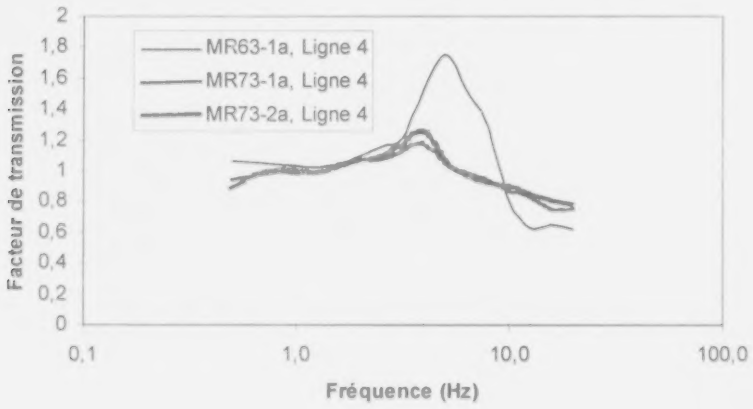


Figure 9 : Courbes de transmissibilité vibratoire des strapontins utilisés dans différents types de motrice pour des conditions d'opération identiques

5. ÉVALUATION DU COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES MOTRICES ET DE LA SUSPENSION

Cette partie de l'étude concerne la détermination des caractéristiques spectrales des vibrations mesurées au plancher des motrices, sur les bogies et sur l'essieu dans les différentes directions de mesure. Celles-ci incluent les mouvements verticaux (z), latéraux (y), et de roulis ($\ddot{\phi}$) pour le caisson, les mouvements verticaux (z), latéraux (y), de roulis ($\ddot{\phi}$), et de tangage ($\ddot{\theta}$) pour le bogie et les mouvements verticaux (z), latéraux (y), et de roulis ($\ddot{\phi}$) pour l'essieu. Les spectres en fréquence de la densité spectrale de puissance (DSP) des accélérations vibratoires permettent l'identification des fréquences dominantes associées aux différents modes vibratoires. Quant aux modes vibratoires associés aux mouvements longitudinaux (x), de tangage ($\ddot{\theta}$) et de lacet ($\ddot{\psi}$) pour le caisson, ainsi qu'aux mouvements longitudinaux (x) et de lacet ($\ddot{\psi}$) pour le bogie, la faible intensité des vibrations mesurées dans ces directions permet de les exclure de l'analyse présentée ci-dessous.

Considérant le peu d'influence que présentent la période d'affluence, l'état d'entretien et la position de la motrice sur les caractéristiques vibratoires, il est permis d'établir les tendances relatives aux caractéristiques spectrales en combinant l'ensemble des spectres en fréquence moyen pour les motrices MR-63, puis pour les motrices MR-73. Les résultats présentés dans cette section sont basés uniquement sur les données recueillies lors du parcours des motrices sur la ligne 4 qui présente les niveaux vibratoires les plus élevés. Outre les différences observées sur l'intensité vibratoire, l'allure des spectres en fréquence est apparue comme étant relativement semblable pour les parcours réalisés sur les différentes lignes de métro. Ainsi, les résultats présentés dans les sections qui suivent sont basés sur la moyenne des spectres en fréquence établis pour l'ensemble de chaque type de motrices MR-63 et MR-73 (4 motrices x 2 périodes d'affluence x 2 positions pour chaque type) opérant sur la ligne 4. Évidemment, l'état d'usure des pneus et l'ovalisation provoquent des différences sur l'intensité des vibrations mais pas sur la fréquence à laquelle les différents modes vibratoires apparaissent.

5.1 Modes vibratoires en direction verticale

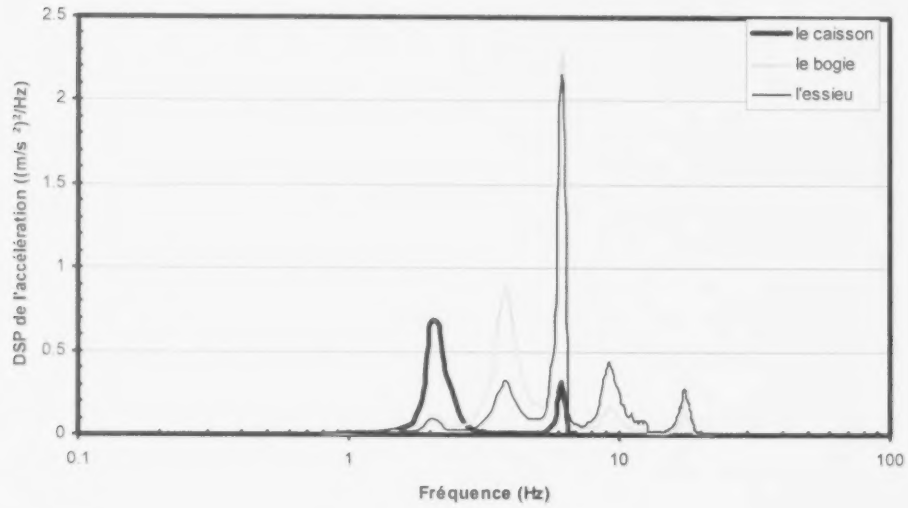
Les figures 10a et 10b présentent les spectres en fréquence moyens de la DSP mesurés en direction verticale sur le caisson, le bogie et l'essieu pour les motrices MR-63 et MR-73, respectivement alors qu'elles étaient en opération sur la ligne 4. Ces résultats démontrent clairement des différences évidentes dans le comportement dynamique des motrices MR-63 et MR-73. Les niveaux vibratoires sont nettement plus importants dans les motrices MR-63 et les modes vibratoires mettent clairement en évidence une composante en fréquence apparaissant à 6 Hz qui est particulièrement dominante sur le bogie et l'essieu pour la motrice MR-63. Cette composante est aussi évidente pour les motrices MR-73, mais de façon beaucoup moins prononcée.

Pour les motrices MR-63, le spectre vibratoire au plancher de la motrice démontre une fréquence dominante à 2,1 Hz, correspondant au mode de vibration verticale du caisson, et une fréquence d'amplitude secondaire qui serait associée au mode de vibration verticale du bogie. Quant au bogie et à l'essieu, les spectres en fréquence présentent des pics distincts à 2,1, 4, 6, 10 et 18 Hz.

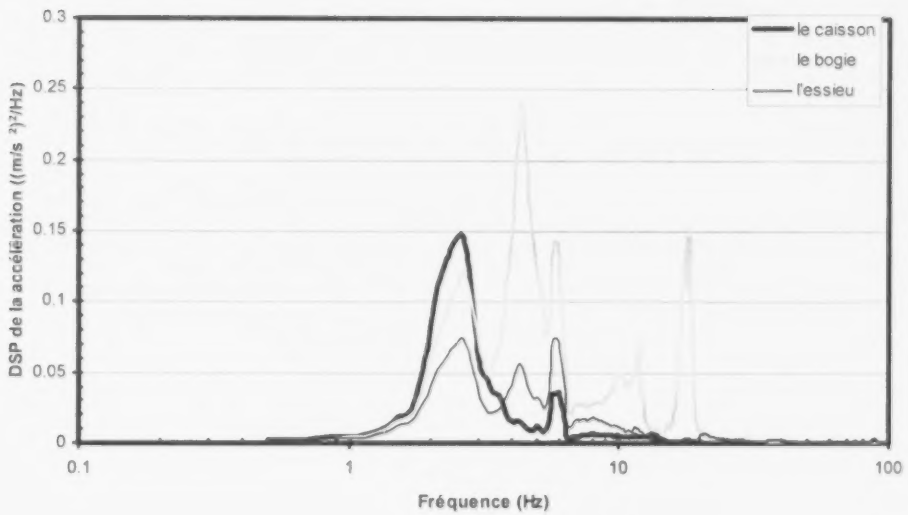
Les composantes à 4, 10 et 18 Hz seraient associées respectivement au mode de tangage du bogie, au mode de vibration verticale de l'essieu et au mode de roulis de l'essieu. Par ailleurs, le spectre en fréquence des vibrations verticales du caisson des motrices MR-73 démontre des composantes dominantes à 2,4 Hz et à 6 Hz associées respectivement aux modes de vibration verticale du caisson et du bogie. De plus, les spectres en fréquence pour le bogie et l'essieu des MR-73 présentent des composantes dominantes à 2,4, 4,5, 6, 10-12 Hz et 18 Hz. Ainsi, les modes de vibration verticale du caisson, de tangage du bogie et des vibrations verticales de l'essieu apparaissent à des fréquences sensiblement plus élevées pour les motrices MR-73 que pour les MR-63. Le fait que le mode de vibration verticale du caisson apparaisse à plus basse fréquence pour les motrice MR-63 suggère que la raideur de la suspension serait moins importante pour cette motrice en raison de l'insertion d'un élément élastique entre le ressort hélicoïdal et le caisson.

5.2 Modes vibratoires de roulis

Les spectres moyens de la densité spectrale de puissance des accélérations angulaires de roulis pour le caisson, le bogie et l'essieu sont présentés dans les figure 11a et 11b, respectivement. Ces spectres démontrent que l'énergie vibratoire associée au roulis du caisson est négligeable pour les deux types de motrices. Bien que non mis en évidence dans les spectres présentés, le mode de vibration de roulis des motrices apparaitrait à 1 Hz pour les MR-73 et à 0,75 Hz pour les MR-63. Par ailleurs, les spectres moyens pour le bogie et l'essieu démontrent des composantes dominantes apparaissant à 6, 10 et 18 Hz pour les motrices MR-63 et à 6, 10-12 et 18 Hz pour les MR-73. Il s'agirait respectivement des modes de vibrations verticales du bogie, des vibrations verticales de l'essieu et du mode des vibrations angulaires de roulis de l'essieu. Les spectres mettent à nouveau en évidence le fait que les intensités vibratoires pour le bogie et les essieux sont plus importantes dans les motrices MR-63 que dans les MR-73. La présence importante des composantes en fréquence associées aux modes de vibration verticale du bogie et de l'essieu dans les spectres vibratoires du roulis illustrent un couplage important des modes de vibrations pour le bogie et les essieux.

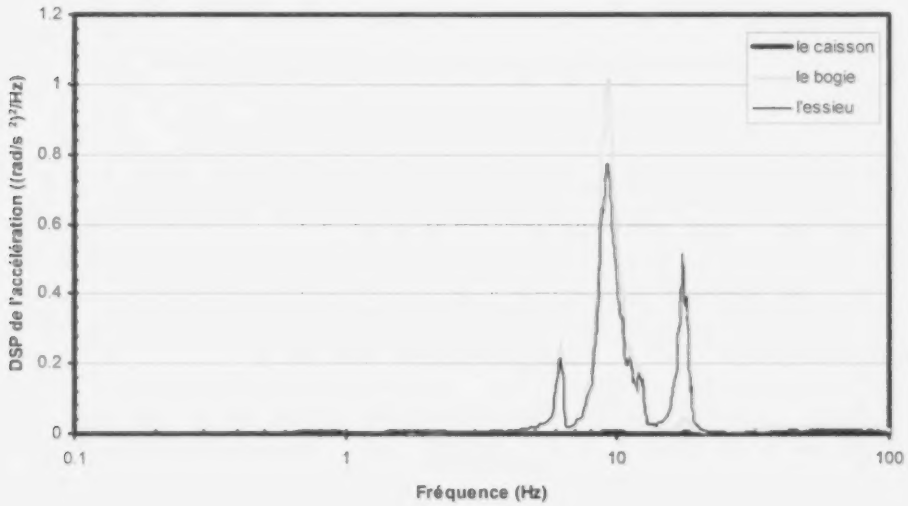


(a)

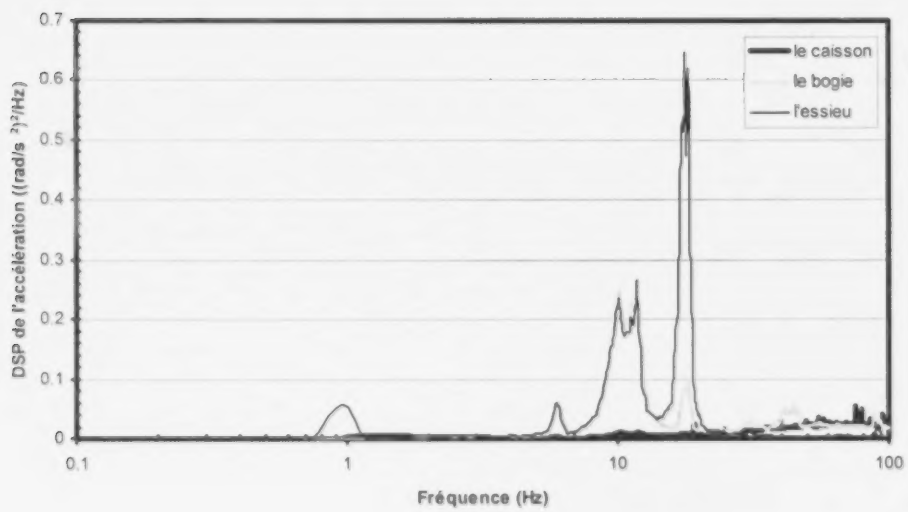


(b)

Figure 10 : Spectres en fréquence moyens de la DSP mesurés en direction verticale sur le caisson, le bogie et l'essieu pour : (a) les motrices MR-63 et (b) les motrices MR-73 (Ligne 4)



(a)



(b)

Figure 11 : Spectres en fréquence moyens de la DSP mesurés pour le roulis sur le caisson, le bogie et l'essieu pour : (a) les motrices MR-63 et (b) les motrices MR-73 (Ligne 4)

5.3 Modes vibratoires des accélérations latérales

L'intensité des vibrations latérales est relativement faible pour les deux types de motrice, mais plus particulièrement pour les motrices MR-73. Les figures 12a et 12b illustrent les spectres en fréquence moyens pour les deux types de motrices. Les vibrations latérales apparaissent de façon dominante entre 3 et 4 Hz au niveau du bogie et de l'essieu pour les motrices MR-63, tandis que les spectres associés aux motrices MR-73 ne présentent pas de composantes évidentes associées à ce mode.

5.4 Mode vibratoire de tangage du bogie

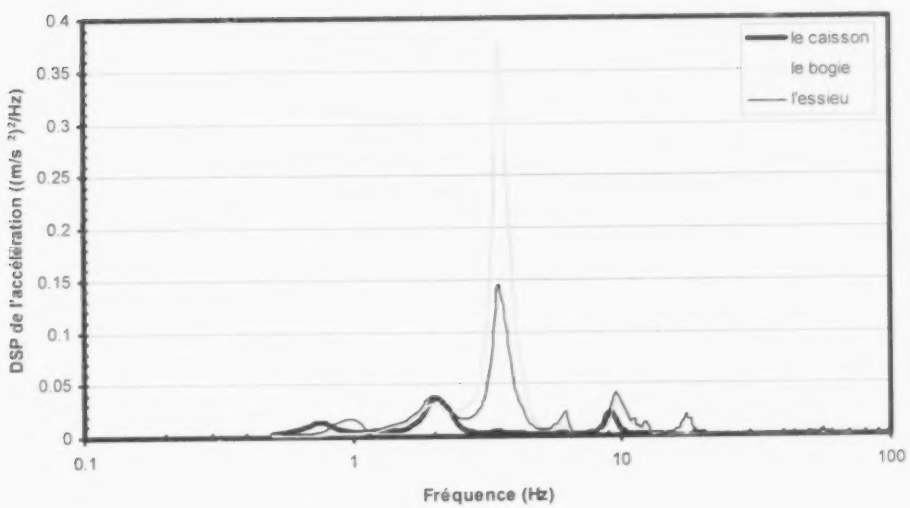
Les spectres sont présentés uniquement pour le bogie dans les figures 13a et 13b applicables aux motrices MR-63 et MR-73, respectivement. Ces résultats démontrent une prédominance des vibrations du tangage à proximité de 4 Hz pour les MR-63 et entre 4 et 5 Hz pour les MR-73. Ces fréquences seraient associées au mode de vibration angulaire de tangage du bogie incluant la suspension qui comporte les barres de torsion. Les résultats démontrent également que les modes vibratoires du roulis de l'essieu et des vibrations verticales du bogie sont fortement couplés au mode de vibration du tangage du bogie.

5.5 Sommaire des modes vibratoires

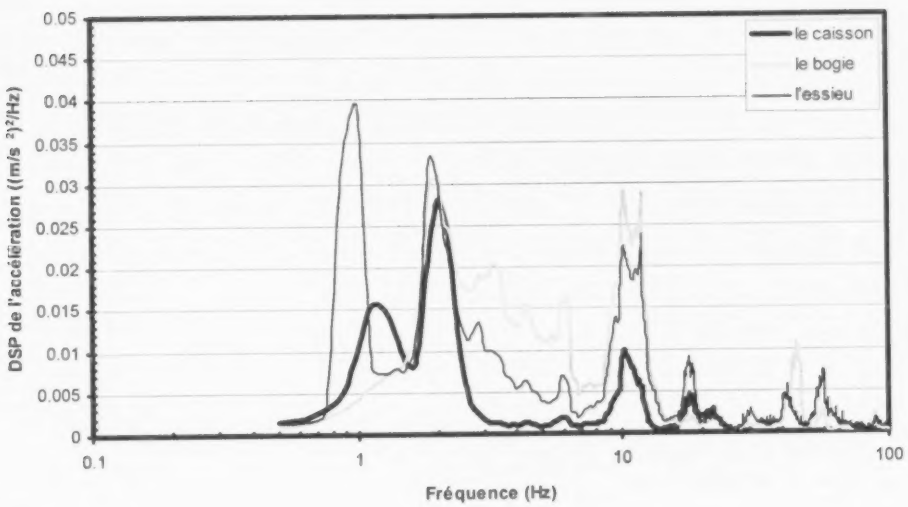
Le tableau 11 présente un sommaire des caractéristiques dynamiques des motrices MR-63 et MR-73 pour les différents modes vibratoires tels qu'identifiés dans les sections 5.1 à 5.4. Des différences évidentes apparaissent entre les caractéristiques dynamiques des motrices MR-63 et MR-73 qui seraient essentiellement liées à des différences au niveau de leur système de suspension. En effet, la raideur de la suspension des motrices MR-63 entre le bogie et le caisson serait beaucoup moins importante que celle des motrices MR-73, ce qui explique que le mode de

TABLEAU 11 : Fréquences des modes vibratoires des composantesdes motrices MR-63 et MR-73

MODE VIBRATOIRE	MR-63 Fréquence (Hz)	MR-73 Fréquence (Hz)
Caisson :		
• Vertical	2,1	2,4
• Roulis	0,75	1
Bogie :		
• Vertical	6	6
• Latéral	3-4	nd
• Tangage	4	4,5
Essieu :		
• Vertical	10	10-12
• Roulis	18	18
• Latéral	3-4	nd

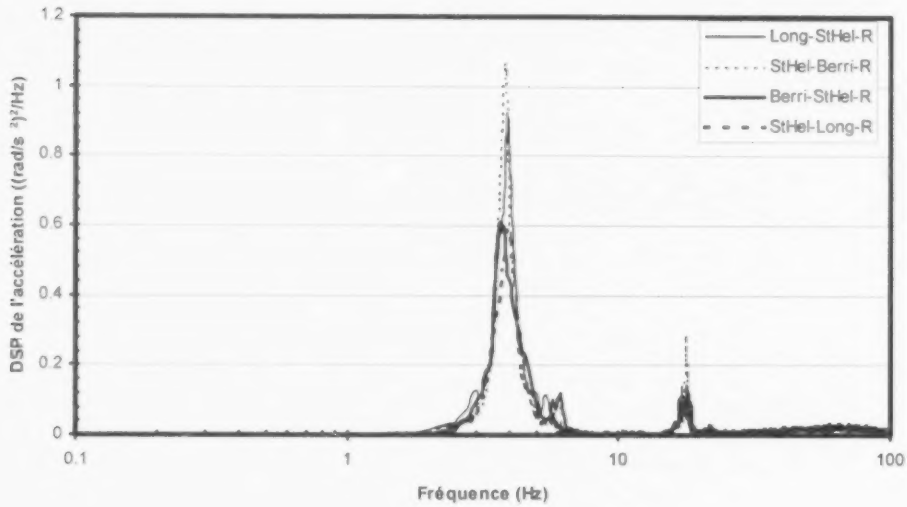


(a)

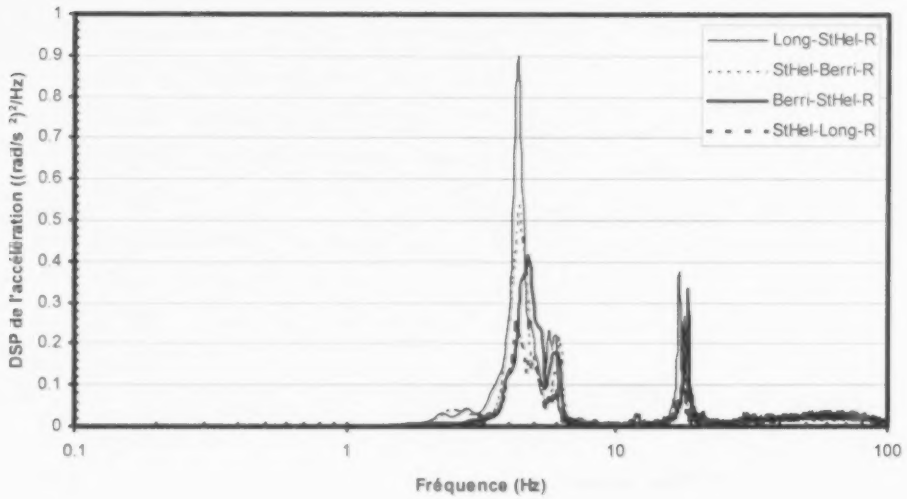


(b)

Figure 12 : Spectres en fréquence moyens de la DSP mesurés en direction latérale sur le caisson, le bogie et l'essieu pour : (a) les motrices MR-63 et (b) les motrices MR-73 (Ligne 4)



(a)



(b)

Figure 13 : Spectres en fréquence moyens de la DSP mesurés pour le tangage du bogie pour: (a) les motrices MR-63 et (b) les motrices MR-73 (Ligne 4)

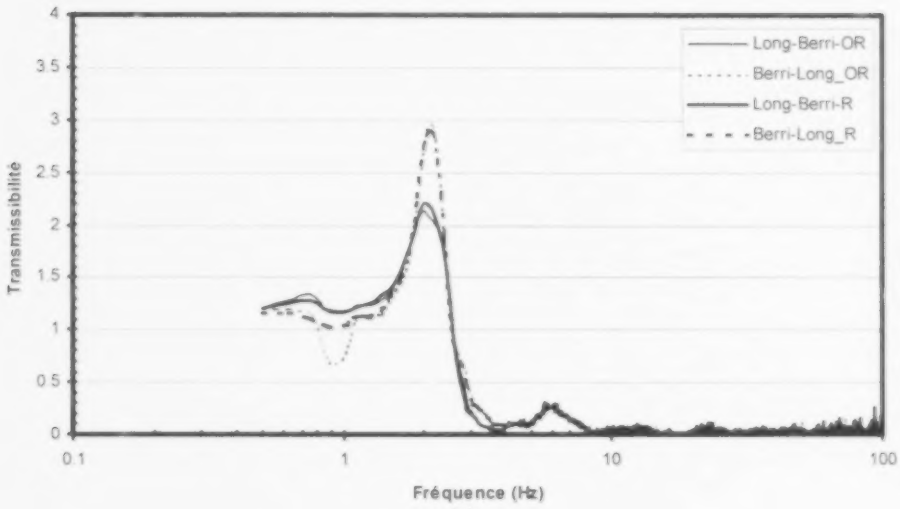
vibration verticale apparaisse à plus basse fréquence pour les MR-63. Ceci serait attribuable à l'inclusion d'un élément élastique entre les ressorts et le caisson pour ce type de motrice, qui diminue la raideur effective de la suspension. Pour les deux types de motrice, les caractéristiques de masse sont relativement similaires telles que rapportées dans le tableau 1.

Les caractéristiques du mode vibratoire associé au roulis diffèrent également entre les deux types de motrices et des accélérations angulaires de roulis d'intensité importante apparaissent à des fréquences supérieures à 20 Hz qui seraient liées à des modes structuraux de flexion en torsion du châssis et du caisson pour les deux types de motrices. Quant au tangage, bien que les accélérations angulaires soient apparues comme étant de faible intensité dans le caisson des deux types de motrices, celles mesurées sur les bogies révélaient des niveaux considérables qui seraient attribuables aux mouvements de la barre de torsion et possiblement aussi à la distribution inégale de la charge dans les motrices. Le fait qu'aucune variation importante des caractéristiques dynamiques n'ait été observée qui soit liée à la période d'affluence, suggère que la suspension du bogie et les supports pour les essieux pourraient avoir des caractéristiques de raideur qui augmentent en fonction de la charge.

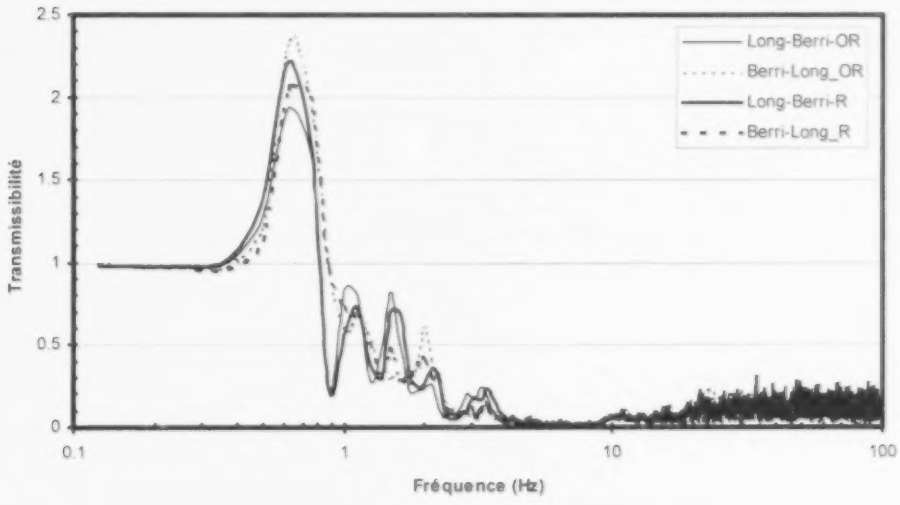
5.6 Comportement dynamique de la suspension

Les résultats sont présentés uniquement pour les modes de vibration verticale et de roulis qui constituent les modes dominants de vibrations dans les motrices MR-63 et MR-73. Les fonctions de transfert entre le bogie et le caisson représentent le ratio des accélérations vibratoires du caisson et du bogie et permettent d'évaluer l'efficacité de la suspension en identifiant les plages de fréquence où il y a atténuation et amplification. À titre d'exemple, les figures 14 et 15 présentent respectivement les résultats obtenus pour une motrice MR-63 et MR-73 opérant sur la ligne 4. Les courbes de transmissibilité présentées démontrent que les vibrations verticales du bogie qui prédominent à 6 Hz sont effectivement atténuées par la suspension mais que par ailleurs, le roulis est accentué à la fréquence dominante de 0,75 Hz pour les motrices MR-63 et 1 Hz pour les motrices MR-73. Les courbes démontrent également que les vibrations verticales du bogie sont fortement amplifiées dans le caisson à la fréquence naturelle des motrices, notamment à 2,1 Hz pour les motrices MR-63 et 2,4 Hz pour les motrices MR-73.

De façon plus précise, les courbes présentées dans les figures 14 et 15 suggèrent que la suspension est efficace pour atténuer les vibrations verticales au-delà de 3 Hz pour les MR-63 et 3,4 Hz pour les MR-73. Pour le roulis, les courbes de transmissibilité démontrent une atténuation des vibrations à des fréquences supérieures à 1,0 Hz pour les MR-63 et 1,7 Hz pour les MR-73. Il faut cependant préciser que même si la suspension permet une atténuation des vibrations à certaines fréquences jugées comme étant critiques, les niveaux de vibrations transmises au caisson pourraient toutefois s'avérer être non négligeables si leur intensité était d'ampleur considérable au niveau du bogie.

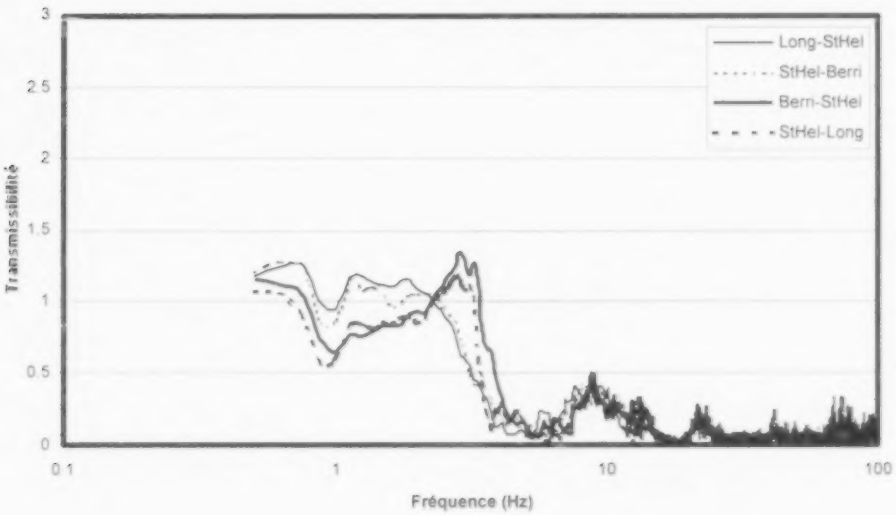


(a)

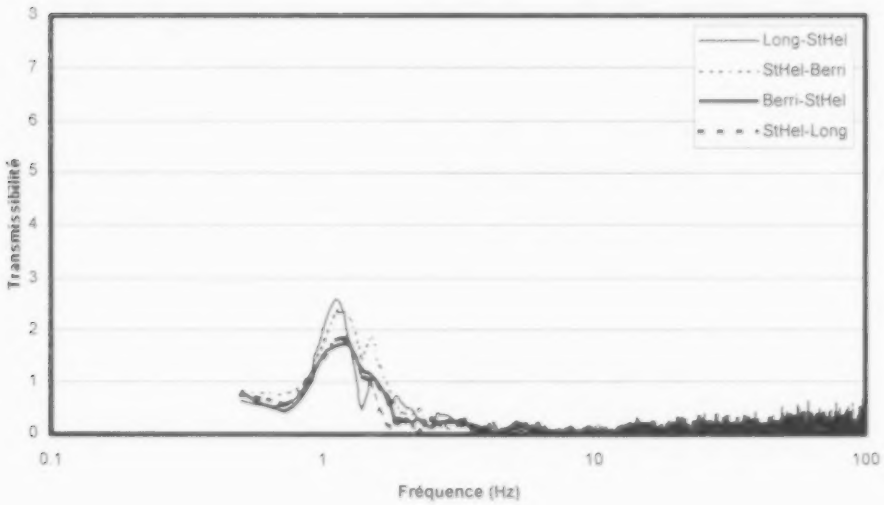


(b)

Figure 14 : Courbes de transmissibilité vibratoire bogie-caisson pour une motrice MR-63: (a) les vibrations verticales ; (b) les vibrations angulaires de roulis (Ligne 4)



(a)



(b)

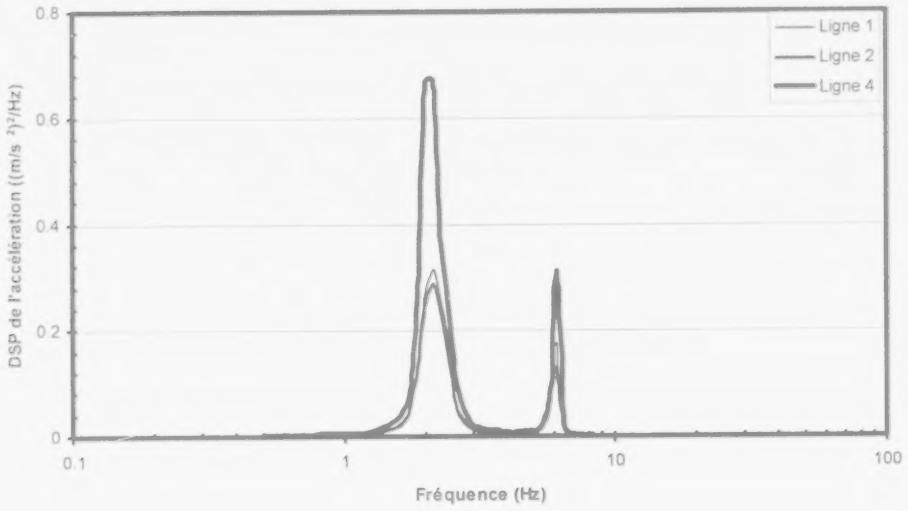
Figure 15 : Courbes de transmissibilité vibratoire bogie-caisson pour une motrice MR-73: (a) les vibrations verticales ; (b) les vibrations angulaires de roulis (Ligne 4)

6. DÉFINITION DES CLASSES SPECTRALES DES VIBRATIONS

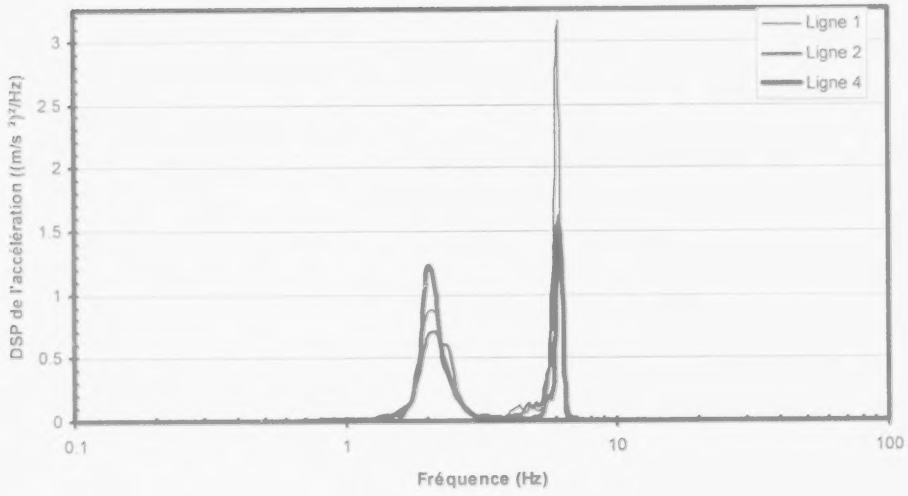
Les vibrations des motrices du métro sont prédominantes en direction verticale et pour les mouvements de roulis et représentent donc celles qui sont les plus susceptibles d'affecter le confort des opérateurs et des passagers. C'est pourquoi, il est proposé de définir les caractéristiques spectrales propres à ces deux modes vibratoires pour les deux types de motrices MR-63 et MR-73 en combinant l'ensemble des données recueillies pour celles-ci lorsqu'elles se déplacent sur les différentes lignes du métro de Montréal. Des spectres moyens sont définis, représentant les caractéristiques spectrales susceptibles de prévaloir lors des opérations normales du métro, tout en tenant compte des variations pouvant être liées à l'opération du métro sur les différentes lignes et des différences attribuées à l'ovalisation et à l'usure des pneus. Par ailleurs, les valeurs maximales des spectres définissant les limites supérieures des données utilisées pour définir les spectres moyens peuvent être retenues pour définir des conditions vibratoires plus sévères qui résulteraient en des caractéristiques vibratoires se situant à la limite de ce qui peut être atteint dans des conditions normales d'opération.

Les figures 16 et 17 présentent les spectres moyens de la densité spectrale de puissance des accélérations vibratoires et ceux définissant la limite supérieure pour les motrices MR-63 et MR-73, respectivement. Ces caractéristiques spectrales sont présentées pour chaque ligne de métro et résultent de la combinaison des données recueillies pour l'ensemble des motrices opérant dans les diverses conditions d'opération incluant des variations liées à la période d'affluence, la position de la motrice, l'état de maintenance, l'usure et l'ovalisation des pneus. Les spectres présentés pour les motrices MR-63 dans la figure 16 mettent en évidence deux pics distincts apparaissant à 2,1 Hz et à 6 Hz. Sur chacune des lignes de métro, la composante dominante du spectre moyen apparaît à 2,1 Hz pour l'ensemble des lignes. Comme mentionné précédemment dans la section 5.1, cette fréquence est attribuée au mode de vibration verticale du caisson. Par ailleurs, la composante secondaire apparaissant à 6 Hz correspond au mode de vibration verticale du bogie. Il est intéressant de noter que dans la définition de l'enveloppe de valeurs maximales du spectre en fréquence associé aux motrices MR-63, la figure 16b démontre que la composante vibratoire à 6 Hz prédomine en intensité sur celle apparaissant à 2,1 Hz. En effet, cette composante n'est pas toujours présente de façon importante pour l'ensemble des motrices et des interstations puisque sa présence est dépendante de certaines conditions liées à la vitesse et à l'ovalisation des pneus. Dans les conditions favorisant la présence de cette composante à 6 Hz, cette dernière a généralement tendance à prédominer sur la composante à 2,1 Hz, ce que les spectres des valeurs maximales (conditions sévères) mettent en évidence.

Pour les motrices MR-73, les spectres moyens présentés dans la figure 17a démontrent clairement une fréquence dominante apparaissant à 2,4 Hz pour l'ensemble des lignes de métro, correspondant au mode de vibration verticale du caisson. Une composante secondaire apparaît aussi à 6 Hz étant associée au mode de vibration verticale du bogie, mais son intensité est beaucoup plus faible que celle de la première composante ainsi que celle apparaissant dans la figure 16a pour les motrices MR-63. D'ailleurs, en comparant les spectres des figures 16 et 17, il devient évident que les intensités vibratoires sont beaucoup plus faibles pour les motrices MR-73 que pour les MR-63. Quant aux spectres présentés dans la figure 17b qui définissent les valeurs maximales applicables aux motrices MR-73, ceux-ci mettent en évidence des composantes dominantes apparaissant à 2,4 Hz, 4,5 Hz, 6 Hz et 9 Hz, lesquelles sont associées

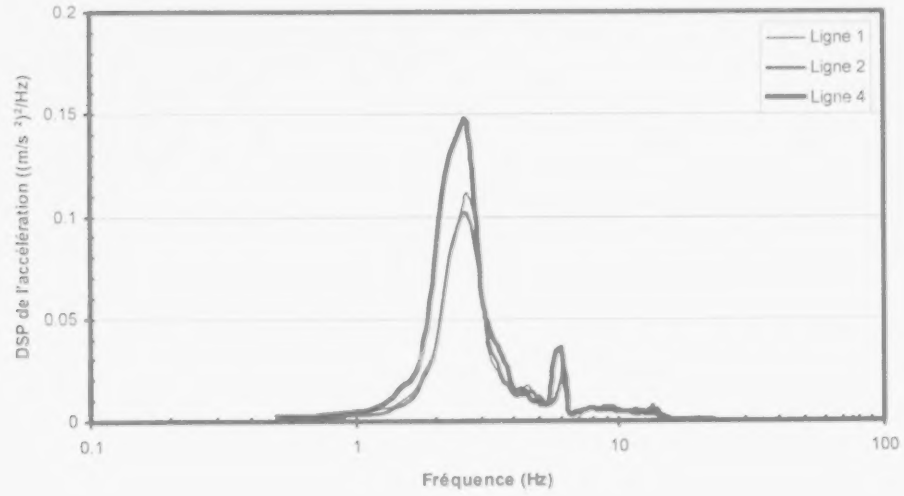


(a)

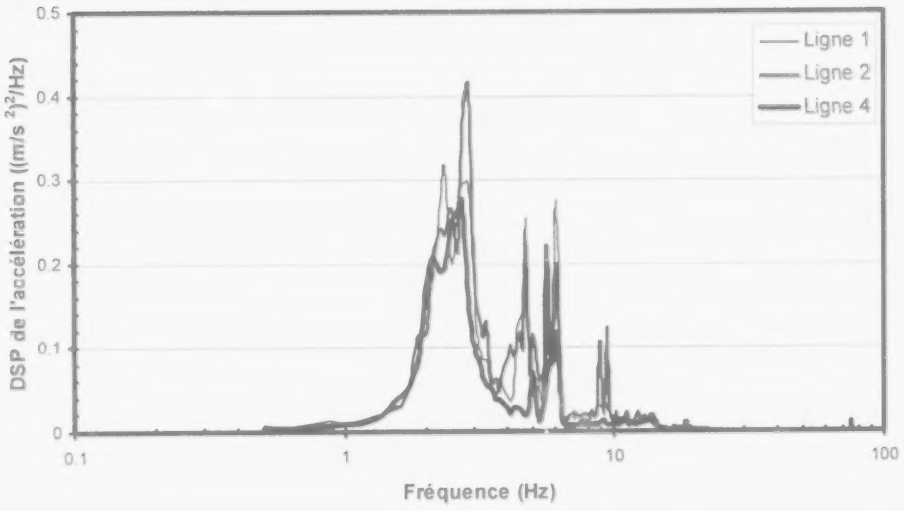


(b)

Figure 16 : Spectres en fréquence de la DSP mesurés en direction verticale sur les différentes lignes de métro pour les motrices MR-63: (a) spectres moyens (b) enveloppe des valeurs maximales



(a)



(b)

Figure 17: Spectres en fréquence de la DSP mesurés en direction verticale sur les différentes lignes de métro pour les motrices MR-73: (a) spectres moyens (b) enveloppe des valeurs maximales

respectivement aux modes de vibrations verticales du caisson, au tangage, aux vibrations verticales du bogie et aux vibrations verticales de l'essieu.

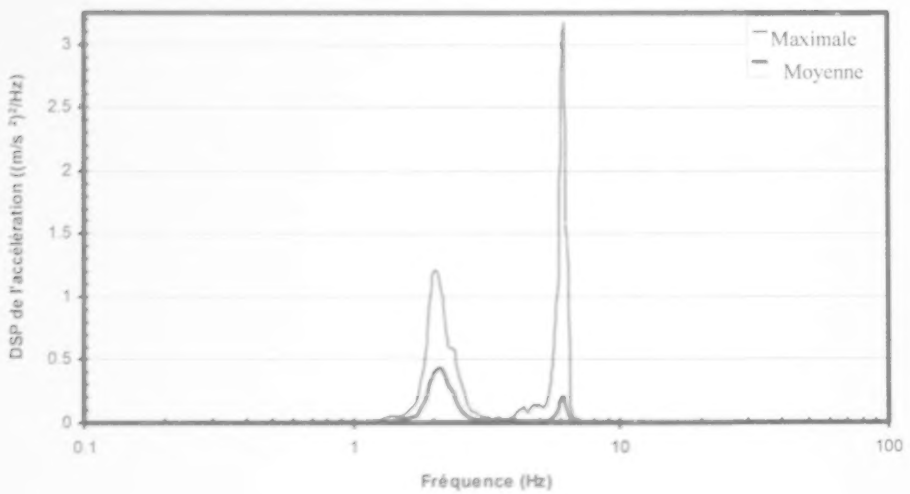
Les classes spectrales définissant les caractéristiques vibratoires moyennes et maximales des motrices MR-63 et MR-73 en direction verticale sont obtenues en faisant la moyenne de l'ensemble des spectres moyens définis dans les figures 16 et 17 pour l'ensemble des lignes de métro. Les spectres résultants sont présentés dans la figure 18a pour les motrices MR-63 et 18b pour les motrices MR-73 et représentent les caractéristiques vibratoires moyenne et maximale qui sont susceptibles d'être mesurées sur le plancher de chacun des deux types de loge. Les valeurs maximales résulteraient de conditions vibratoires parmi les plus sévères, de sorte qu'il est peu probable qu'elles puissent être atteintes dans la réalité. Ces valeurs doivent donc être vues comme présentant une enveloppe maximale qu'il est peu probable d'atteindre ou de dépasser.

En appliquant une approche similaire à celle utilisée pour les vibrations verticales, les classes spectrales pour le roulis peuvent être définies comme présentées dans la figure 19. Ces spectres démontrent des composantes en fréquence non négligeables apparaissant à des fréquences supérieures à 20 Hz qui peuvent être attribuées aux modes de flexibilité de la structure des caissons. Cependant, ces composantes sont peu susceptibles d'avoir une influence importante sur les niveaux d'exposition aux vibrations considérant que la pondération en fréquence à appliquer accorde peu d'importance aux composantes en fréquence au-delà de 20 Hz. Par ailleurs, les composantes à plus basses fréquences sont susceptibles d'affecter le confort et la stabilité des passagers et des opérateurs qui adopteraient une posture debout. En effet, les spectres présentés dans la figure 19 présentent une composante dominante du roulis apparaissant entre 0,75 et 0,9 Hz pour les motrices MR-63 et à environ 1,2 Hz pour les MR-73. Comme mentionné dans la section 5.2, la composante apparaissant à 10 Hz dans les spectres du roulis serait attribuable au mode de vibrations verticales de l'essieu.

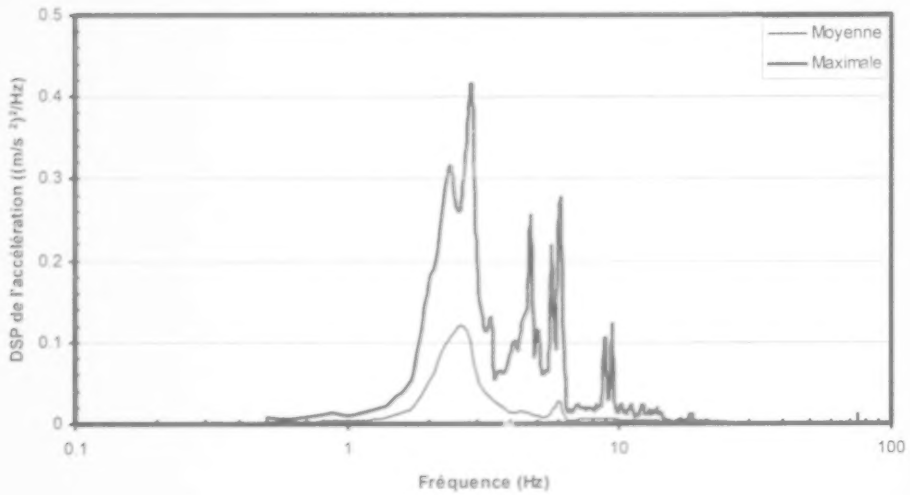
Pour les spectres définissant les classes spectrales des vibrations verticales dans les figures 18a et 18b, le tableau 12 présente les valeurs correspondantes des accélérations efficaces pondérées et non pondérées. Les valeurs moyennes des accélérations pondérées sont comparables à celles mesurées telles que rapportées précédemment dans le tableau 8. Quant aux valeurs pondérées correspondant aux spectres définissant l'enveloppe maximale, elles excèdent sensiblement les niveaux mesurés pour certaines des interstations qui présentaient les niveaux les plus élevés, tels que rapportés dans les tableaux 4 à 7.

TABLEAU 12 : Accélération efficace pondérée et non pondérée correspondant aux spectres définissant les classes spectrales des vibrations verticales des motrices.

MOTRICE	Accélération non pondérée z-plancher (ms^{-2})		Accélération pondérée (ms^{-2}) z-plancher (ms^{-2})	
	moyen	max	moyen	max
MR-63	0,62	1,55	0,48	1,45
MR-73	0,48	0,99	0,38	0,86

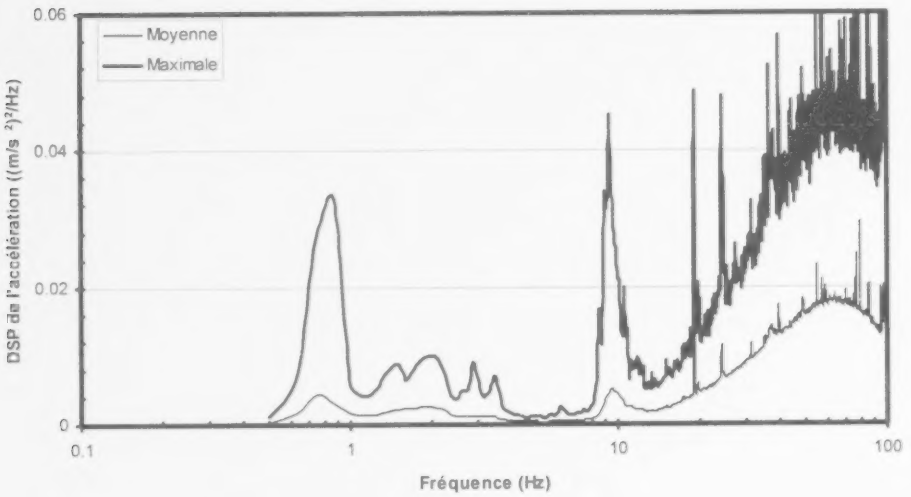


(a)

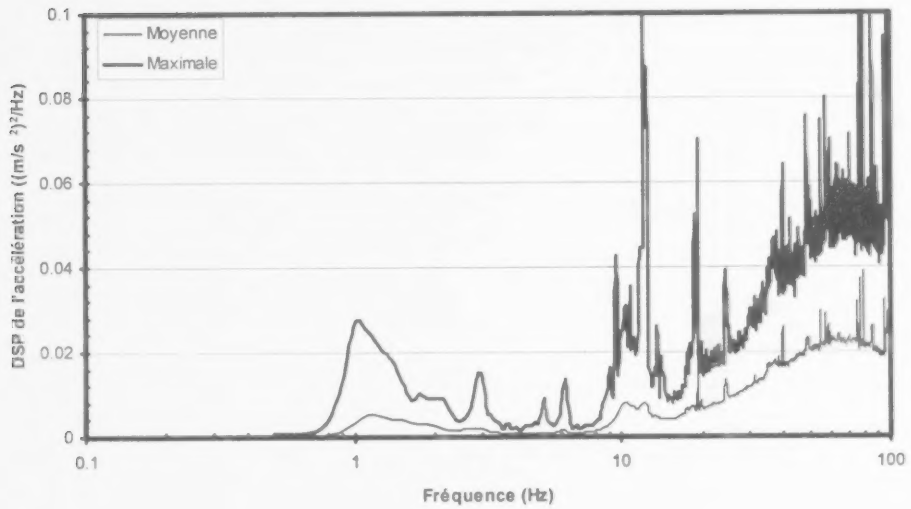


(b)

Figure 18 : Spectres en fréquence de la DSP représentant les classes spectrales en direction verticale pour: (a) les motrices MR-63 (b) les motrices MR-73



(a)



(b)

Figure 19 : Spectres en fréquence de la DSP représentant les classes spectrales de roulis pour: (a) les motrices MR-63 (b) les motrices MR-73

7. DÉFINITION DES EXIGENCES DE CONCEPTION : SIÈGE ET SUSPENSION

En s'appuyant sur les caractéristiques dynamiques mesurées pour les deux types de motrices utilisées pour le métro de Montréal et sur les données servant à caractériser l'exposition aux vibrations globales du corps pour les opérateurs, les moyens devant servir à diminuer les niveaux de vibrations verticales transmises aux opérateurs peuvent être définis. Même si l'étude met en évidence que l'accent doit être mis sur l'atténuation des vibrations verticales, il convient de souligner que l'atténuation du roulis à basses fréquences permettrait aussi de stabiliser le roulement, ce qui pourrait bénéficier aux passagers et à l'opérateur, particulièrement lorsqu'ils ont à se maintenir debout à l'intérieur des motrices. Les mesures suivantes sont proposées dans le but de réduire les niveaux de vibrations verticales transmises aux opérateurs et apparaissent en ordre croissant du niveau de complexité requis pour leur implantation :

1. Incorporation d'un siège qui viserait à réduire de façon importante la composante en fréquence apparaissant à 6 Hz, laquelle provient du mode de vibration verticale du bogie et se situe dans la plage de fréquences de sensibilité maximale du corps humain. Cette composante en fréquence contribue à elle seule, de façon importante, à accentuer le niveau d'accélération efficace pondérée mesurée sur les strapontins actuels. Par ailleurs, des niveaux importants sont aussi générés à la fréquence dominante du mode de vibration verticale des motrices, laquelle se situe à 2,1 Hz et à 2,4 Hz, respectivement pour les motrices MR-63 et MR-73. L'atténuation de ces composantes basses fréquences requiert nécessairement l'utilisation d'un siège à suspension dont la fréquence naturelle doit être inférieure à la fréquence d'excitation à atténuer. Plus précisémment, la fréquence naturelle d'un siège à suspension devrait être inférieure à 1,4 Hz pour permettre une atténuation des vibrations des motrices MR-63 à 2,1 Hz et inférieure à 1,7 Hz pour atténuer les vibrations des motrices MR-73 à 2,4 Hz. En ce qui concerne l'amortissement fourni par les sièges, celui-ci doit être suffisant pour que le siège n'amplifie pas exagérément les vibrations à la fréquence naturelle, mais pas trop important pour ne pas réduire l'atténuation qui peut être atteinte à la fréquence de 6 Hz. Un siège ayant un coefficient d'amortissement réduit ξ=0,45, permettrait de limiter l'amplification à la résonance à 50 % et d'anticiper un facteur de transmission de 0,22 (78 % d'atténuation) à la fréquence de 6 Hz pour les motrices MR-63 (siège avec fréquence naturelle de 1,4 Hz), et de 0,28 (72 % d'atténuation) dans les motrices MR-73 (siège avec fréquence naturelle de 1,7 Hz). Pour un siège possédant une fréquence naturelle inférieure, des niveaux d'atténuation supérieurs à ceux apparaissant ci-dessus seraient réalisables en maintenant le degré d'amortissement au même niveau. Un tel scénario pourrait être approprié, compte tenu que les déplacements verticaux liés aux sollicitations vibratoires ne sont pas excessifs et n'engendreraient vraisemblablement pas des mouvements relatifs importants de la suspension qui risqueraient d'interférer avec les manœuvres de conduite des opérateurs.

2. Intégration d'amortisseurs à la suspension des bogies pour limiter les vibrations transmises dans la loge des opérateurs à la fréquence dominante du mode de vibration verticale des motrices (2,1 Hz pour les MR-63 et 2,4 Hz pour les MR-73) ainsi qu'à la fréquence du mode de vibrations verticales du bogie (6 Hz pour les deux types de motrices). L'incorporation d'amortisseurs à la suspension actuelle permettrait aussi de réduire les mouvement de roulis et procurerait une meilleure stabilité des motrices. Ceci

pourrait être réalisé en insérant les amortisseurs à l'intérieur des deux ressorts hélicoïdaux qui sont présentement utilisés ; ce qui nécessiterait de mettre en place des moyens visant à dissiper la chaleur développée par les amortisseurs. Une solution alternative consisterait à étudier la possibilité d'intégrer quatre amortisseurs entre le bogie et le caisson, en positionnant deux amortisseurs à l'avant et deux à l'arrière. Ceci présenterait l'avantage de réduire les mouvements de tangage apparaissant entre 4 et 4,5 Hz et qui sont transmis dans les motrices sous forme de mouvements verticaux. L'ajout d'amortisseurs pourrait aussi permettre d'opérer à des vitesses sensiblement plus élevées en raison de la plus grande stabilité.

3. En raison de l'importance des vibrations produites à 6 Hz, particulièrement lorsque la vitesse de déplacement excède 60 km/h, il importe de contrôler le plus possible le phénomène d'ovalisation des pneus qui accentue les sollicitations à la fréquence naturelle du bogie.

4. Reconfiguration complète de la suspension du bogie et du support pour essieux en tenant compte du comportement dynamique des diverses composantes des motrices incluant le bogie, le caisson et les essieux. Parmi les options possibles, les concepts de suspension pneumatique pourraient être considérés comme alternatives à ceux utilisés présentement qui comportent seulement des éléments mécaniques. Ceci aurait comme avantage de pouvoir adapter la suspension selon les charges transportées.

8. CONCLUSION

Cette étude a permis de mesurer et d'analyser les vibrations auxquelles sont exposés les opérateurs du métro de Montréal dans l'exercice de leur travail et d'évaluer le comportement dynamique des deux types de motrices, MR-63 et MR-73, présentement utilisés. Les essais ont été réalisés en intégrant des variations dans les conditions d'opérations, notamment sur la période d'affluence (période de pointe vs hors-pointe), l'usure des pneus (neufs, au tiers de leur vie utile), la position des motrices (tête vs queue de train) et l'état d'entretien (sortant ou due pour un entretien complet). En tout, quatre motrices MR-63 et quatre motrices MR-73 ont été amenées à opérer sur chacune des quatre lignes du métro de Montréal en introduisant des variations dans leurs conditions d'opération.

Les résultats des mesures de l'exposition aux vibrations globales du corps sur les strapontins des différentes motrices ont démontré que les niveaux se situent à proximité de la « zone de précaution santé » définie dans la norme ISO 2631-1 :1997 pour les opérateurs des motrices MR-73 et à l'intérieur de cette zone pour les motrices MR-63 dont l'utilisation est limitée au parcours sur la ligne 1. Ceci est particulièrement le cas lorsque la motrice MR-63 est munie de pneus présentant une ovalisation hors-tolérance. Des différences ont pu être observées sur les niveaux d'exposition aux vibrations liés au parcours sur lequel les motrices étaient amenées à opérer et à l'état d'ovalisation des pneus. Par ailleurs, aucun effet n'a pu être associé à la période d'affluence, la position de la motrice, l'état d'entretien et l'usure des pneus.

Pour les deux types de motrices, les vibrations sont apparues comme étant dominantes en direction verticale et présentent une concentration d'énergie à 2,1 Hz pour les MR-63 et à 2,4 Hz pour les MR-73, correspondant à la fréquence du mode de vibration verticale des motrices. Les résultats des mesures ont également démontré qu'une composante importante des vibrations apparaissait à la fréquence de 6 Hz pour les deux types de motrice, correspondant au mode de vibration verticale du bogie. De plus, cette composante est apparue comme étant d'intensité plus importante pour les motrices MR-63, tout en étant accentuée lorsque la motrice comporte des pneus possédant une ovalisation hors-tolérance et dès que la vitesse de déplacement excède 60 km/h.

Par ailleurs, des variations importantes des niveaux d'exposition aux vibrations ont pu être observées entre les différentes interstations d'une même ligne de métro, lesquelles ont pu être associées à des différences liées à la vitesse et à l'ovalisation des pneus. En effet, certaines des stations plus rapprochées ne permettaient pas d'atteindre et de maintenir une vitesse suffisamment élevée pour solliciter de façon importante le mode vibratoire des bogies. Les strapontins actuels équipant les motrices se sont avérés ne pas être efficaces pour atténuer les vibrations transmises aux opérateurs. Cependant, la suspension actuelle constituée de ressorts hélicoïdaux et d'une barre de torsion entre le bogie et le caisson permet d'atténuer les vibrations à des fréquences supérieures à 3 Hz, mais peut-être pas de façon suffisante pour permettre une atténuation adéquate de la composante apparaissant à 6 Hz, selon les situations.

Parmi les caractéristiques des vibrations à considérer dans la mise en place de moyens visant à limiter l'exposition des opérateurs, la présence d'une composante apparaissant à 6 Hz est apparue comme étant la plus critique puisque se situant dans la plage de fréquences de sensibilité maximale du corps humain. La définition de classes spectrales pour les vibrations verticales et de roulis des motrices MR-63 et MR-73 a permis de mettre en évidence les caractéristiques

spectrales des vibrations représentatives de celles mesurées pour ces deux types de motrices, ouvrant ainsi la voie à l'identification de moyens destinés à en réduire l'importance. Parmi les solutions proposées dans cette étude, l'incorporation d'un siège permettant de réduire de façon efficace la composante en fréquence apparaissant à 6 Hz est considérée comme étant un des moyens les plus simples à mettre en place à court terme. Les exigences concernant les caractéristiques de fréquence naturelle et d'amortissement de sièges qui pourraient être jugées efficaces pour atténuer ces vibrations sont définies dans cette étude, de même que d'autres solutions alternatives qui, selon les critères retenus, pourraient être considérées comme étant complémentaires pour minimiser les niveaux d'exposition aux vibrations globales du corps des opérateurs du métro de Montréal.

Les niveaux importants de vibrations qui ont été enregistrés pour certaines interstations, particulièrement lorsque les pneus présentaient une ovalisation hors-tolérance, suggèrent que des efforts destinés à réduire leur intensité auraient tout avantage à être considérés pour limiter les risques d'atteinte au confort et à la santé des opérateurs qui y sont exposés. En jumelant les résultats de cette étude à celle réalisée en parallèle pour définir les critères de conception optimale du siège et du poste de travail, il est maintenant possible d'entrevoir la possibilité d'adapter un siège qui, tout en procurant les plages d'ajustement requis, pourra permettre d'atténuer les vibrations transmises aux opérateurs. Ces travaux feront d'ailleurs l'objet d'une prochaine étude.

9. BIBLIOGRAPHIE

[1] Bovenzi, M. et Hulshof, C.T.J.(1999) « An updated review of epidemiologic studies on the relationship between exposure to whole-body vibration and low back pain (1986-1997) ». *International Archives of Occupational and Environmental Health* 72 : 351-365.

[2] Boileau, P.É. (2002) « L'exposition à des vibrations globales du corps et son rôle dans l'étiologie des maux de dos », *Travail et santé*, 18, 1-5.

[3] Klarin, M.M., Cvijanovic, J.M., et coll. (2001) « Additional adjustment of the driver seat in accordance with the latest anthropometric measurements of drivers in Belgrade » *Proc Instn Mech Engrs* 215 D, 709-712.

[4] Boileau, P.-É., Rakheja, S. (1995) « Étude des paramètres affectant l'efficacité d'atténuation des vibrations par un siège suspendu », Rapport de recherche IRSST R-095, Montréal, Qc., 46 p.

[5] Johanning, E. (1991) « Back disorders and health problems among subway train operators exposed to whole-body vibration », *Scand J Work Environ Health* 17, 414-419.

[6] Johanning, E., Wilder, D.G., et coll. (1991) « Whole-body vibration exposure in subway cars and review of adverse health effects », *J Occup Medicine* 33, 605-612.

[7] Ozkaya, N., Willems, B., et coll. (1994) Whole-body vibration exposure experienced by subway train operators, *J Low Frequency Noise and Vibration* 13, 13-18.

[8] Ozkaya, N., Willems, B., Goldsheyder, D. (1994) Whole-body vibration exposure : A comprehensive field study, *Am Ind Hyg Assoc J.* 55 :1164-1171.

[9] Ozkaya, N., Goldsheyder, D., Willems, B. (1996) Effect of operator seat design on vibration exposure, *Am Ind Hyg Assoc J* 57 :837-842.

[10] Ozkaya, N., Goldsheyder, D., Willems, B. (1997) Effect of subway car design on vibration exposure, *Int J Ind Ergonomics* 19 :377-385.

[11] Bellemare, M., Beaugrand, S., Champoux, D., Larue, C., Massicotte, P., Gonella, M. (2004) Définition de la problématique SST des opérateurs du métro et des possibilités de reconception des loges de conduite. Rapport Études et recherches, IRSST, Montréal, Qc, 139 p.

[12] Richard, M.J. (2003) Évaluation du profil de la surface des pistes de roulement du métro de Montréal. Rapport Études et recherches R-344, IRSST. Montréal, Qc, 61 p.

[13] Norme internationale ISO 2631-1 (1997). *Vibrations et chocs mécaniques-Évaluation de l'exposition des individus à des vibrations globales du corps – Partie 1 : Exigences générales.*

ANNEXE A

VALEURS DES ACCÉLÉRATIONS EFFICACES PONDÉRÉES MESURÉES POUR L'ENSEMBLE DES MOTRICES ET DES CONDITIONS D'OPÉRATION

Annexe A.1: Motrices sortant d'un entretien – Ligne 1

Motrice/Condition	a_w (ms^{-2})							SEAT
	x-siège	y-siège	z-siège	x-plancher	y-plancher	z-plancher	x-dossier	
MR63-1a								
Pointe, tête	0,10±0,01	0,19±0,02	0,43±0,07	0,06±0,01	0,17±0,02	0,36±0,05	0,24±0,03	1,19
Pointe, queue	0,08±0,01	0,18±0,03	0,39±0,07	0,06±0,01	0,15±0,02	0,36±0,07	0,31±0,05	1,08
Hors-pointe, tête	0,10±0,008	0,20±0,02	0,45±0,05	0,06±0,007	0,18±0,02	0,38±0,05	0,24±0,03	1,18
Hors-pointe, queue	0,08±0,01	0,18±0,03	0,47±0,09	0,06±0,01	0,16±0,02	0,39±0,07	0,27±0,04	1,20
MR63-1b								
Pointe, tête	0,09±0,01	0,18±0,02	0,53±0,15	0,07±0,009	0,17±0,02	0,52±0,16	0,33±0,07	1,02
Pointe, queue	0,09±0,01	0,16±0,02	0,53±0,13	0,07±0,01	0,15±0,02	0,50±0,15	0,36±0,09	1,06
Hors-pointe, tête	0,09±0,008	0,18±0,02	0,51±0,13	0,07±0,007	0,17±0,02	0,51±0,15	0,34±0,07	1,0
Hors-pointe, queue	0,09±0,01	0,17±0,02	0,61±0,15	0,07±0,01	0,15±0,02	0,50±0,12	0,34±0,06	1,22
MR73-1a								
Pointe, tête	0,09±0,01	0,19±0,02	0,41±0,03	0,07±0,01	0,18±0,03	0,39±0,02	0,17±0,02	1,05
Pointe, queue	0,08±0,01	0,19±0,02	0,37±0,03	0,06±0,009	0,16±0,02	0,36±0,03	0,16±0,02	1,03
Hors-pointe, tête	0,09±0,01	0,20±0,03	0,41±0,03	0,07±0,01	0,18±0,03	0,39±0,03	0,18±0,01	1,05
Hors-pointe, queue	0,08±0,01	0,19±0,02	0,39±0,04	0,06±0,01	0,17±0,02	0,37±0,03	0,14±0,02	1,05
MR73-1b								
Pointe, tête	0,08±0,008	0,19±0,02	0,45±0,03	0,06±0,01	0,18±0,03	0,42±0,02	0,19±0,02	1,07
Pointe, queue	0,08±0,02	0,19±0,02	0,40±0,04	0,06±0,02	0,16±0,02	0,37±0,03	0,18±0,04	1,08
Hors-pointe, tête	0,09±0,007	0,19±0,02	0,45±0,03	0,06±0,01	0,18±0,03	0,42±0,03	0,18±0,02	1,07
Hors-pointe, queue	0,07±0,01	0,19±0,02	0,41±0,04	0,06±0,01	0,17±0,02	0,38±0,03	0,16±0,02	1,08

Annexe A.2: Motrices sortant d'un entretien – Ligne 2

Motrice/Condition	a_w (ms^{-2})							SEAT
	x-siège	y-siège	z-siège	x-plancher	y-plancher	z-plancher	x-dossier	
MR63-1a								
Pointe, tête	0,09±0,01	0,19±0,02	0,41±0,07			0,35±0,07	0,26±0,04	1,17
Pointe, queue	0,08±0,02	0,17±0,02	0,47±0,09			0,36±0,07	0,28±0,04	1,30
Hors-pointe, tête	0,08±0,01	0,18±0,02	0,38±0,07			0,34±0,06	0,31±0,04	1,12
Hors-pointe, queue	0,08±0,01	0,16±0,02	0,40±0,08			0,35±0,07	0,24±0,04	1,14
MR63-1b								
Pointe, tête	0,10±0,01	0,18±0,02	0,62±0,17			0,50±0,15	0,33±0,06	1,24
Pointe, queue	0,10±0,01	0,18±0,02	0,52±0,13			0,50±0,16	0,27±0,06	1,04
Hors-pointe, tête	0,08±0,008	0,19±0,02	0,54±0,15			0,54±0,18	0,36±0,08	1,0
Hors-pointe, queue	0,08±0,01	0,17±0,02	0,49±0,12			0,45±0,13	0,32±0,07	1,09
MR73-1a								
Pointe, tête	0,08±0,02	0,19±0,02	0,41±0,03			0,39±0,03	0,18±0,07	1,05
Pointe, queue	0,09±0,01	0,18±0,02	0,39±0,05			0,37±0,05	0,18±0,03	1,05
Hors-pointe, tête	0,08±0,01	0,19±0,02	0,40±0,03			0,39±0,03	0,16±0,02	1,02
Hors-pointe, queue	0,09±0,01	0,17±0,02	0,37±0,04			0,35±0,04	0,16±0,02	1,06
MR73-1b								
Pointe, tête	0,07±0,01	0,17±0,02	0,43±0,04			0,41±0,04	0,16±0,02	1,05
Pointe, queue	0,08±0,01	0,17±0,02	0,40±0,05			0,39±0,05	0,18±0,02	1,02
Hors-pointe, tête	0,07±0,008	0,18±0,02	0,42±0,04			0,40±0,04	0,17±0,02	1,05
Hors-pointe, queue	0,07±0,01	0,16±0,02	0,38±0,04			0,36±0,03	0,16±0,02	1,06

Annexe A.3: Motrices sortant d'un entretien – Ligne 4

Motrice/Condition	a_w (ms^{-2})							SEAT
	x-siège	y-siège	z-siège	x-plancher	y-plancher	z-plancher	x-dossier	
MR63-1a								
Pointe, tête	0,12±0,02	0,19±0,02	0,52±0,06	0,08±0,01	0,19±0,03	0,45±0,06	0,28±0,04	1,16
Pointe, queue	0,12±0,002	0,17±0,01	0,64±0,007	0,09±0,00	0,15±0,01	0,50±0,004	0,38±0,01	1,28
Hors-pointe, tête	0,12±0,001	0,21±0,03	0,47±0,03	0,09±0,004	0,19±0,03	0,46±0,04	0,25±0,02	1,02
Hors-pointe, queue	0,10±0,004	0,18±0,02	0,42±0,03	0,09±0,002	0,15±0,02	0,40±0,04	0,30±0,04	1,05
MR63-1b								
Pointe, tête	0,13±0,009	0,19±0,01	0,87±0,18	0,09±0,001	0,20±0,02	0,91±0,24	0,35±0,04	0,96
Pointe, queue	0,10±0,003	0,16±0,02	0,69±0,10	0,08±0,001	0,15±0,01	0,67±0,11	0,40±0,03	1,03
Hors-pointe, tête	0,11±0,004	0,20±0,02	0,64±0,10	0,10±0,007	0,19±0,03	0,63±0,14	0,40±0,06	1,02
Hors-pointe, queue	0,10±0,002	0,18±0,02	0,74±0,003	0,08±0,001	0,15±0,01	0,74±0,08	0,40±0,00	1,0
MR73-1a								
Pointe, tête	0,07±0,003	0,21±0,04	0,46±0,07	0,06±0,001	0,19±0,04	0,44±0,07	0,15±0,01	1,04
Pointe, queue	0,08±0,008	0,20±0,03	0,44±0,02	0,06±0,003	0,17±0,03	0,42±0,02	0,17±0,02	1,05
Hors-pointe, tête	0,07±0,001		0,46±0,02	0,06±0,001	0,18±0,03	0,44±0,02	0,13±0,008	1,04
Hors-pointe, queue	0,09±0,01		0,44±0,01	0,08±0,01	0,16±0,02	0,41±0,005	0,17±0,02	1,07
MR73-1b								
Pointe, tête	0,07±0,02	0,19±0,03	0,47±0,03	0,06±0,02	0,18±0,03	0,44±0,03	0,17±0,009	1,07
Pointe, queue	0,08±0,009	0,19±0,03	0,44±0,02	0,06±0,006	0,16±0,02	0,43±0,02	0,16±0,02	1,02
Hors-pointe, tête	0,07±0,004	0,19±0,04	0,46±0,04	0,06±0,006	0,18±0,04	0,44±0,05	0,13±0,008	1,04
Hors-pointe, queue	0,08±0,01	0,18±0,02	0,43±0,02	0,06±0,02	0,16±0,02	0,41±0,02	0,17±0,01	1,05

Annexe A.4: Motrices sortant d'un entretien – Ligne 5

Motrice/Condition	a_w (ms^{-2})							SEAT
	x-siège	y-siège	z-siège	x-plancher	y-plancher	z-plancher	x-dossier	
MR63-1a								
Pointe, tête	0,08±0,01	0,15±0,02	0,35±0,05			0,32±0,05	0,23±0,02	1,09
Pointe, queue	0,08±0,01	0,16±0,01	0,44±0,12			0,40±0,12	0,35±0,09	1,10
Hors-pointe, tête	0,08±0,01	0,16±0,02	0,33±0,05			0,30±0,05	0,22±0,02	1,10
Hors-pointe, queue	0,08±0,008	0,16±0,02	0,38±0,11			0,35±0,11	0,26±0,05	1,08
MR63-1b								
Pointe, tête	0,09±0,01	0,16±0,01	0,50±0,11			0,50±0,14	0,23±0,02	1,0
Pointe, queue	0,08±0,02	0,16±0,02	0,52±0,14			0,51±0,16	0,35±0,09	1,02
Hors-pointe, tête	0,08±0,02	0,16±0,02	0,45±0,08			0,43±0,08	0,25±0,02	1,05
Hors-pointe, queue	0,10±0,01	0,16±0,02	0,54±0,21			0,54±0,24	0,32±0,10	1,0
MR73-1a								
Pointe, tête	0,08±0,01	0,17±0,02	0,41±0,04			0,38±0,04	0,20±0,04	1,08
Pointe, queue	0,08±0,02	0,17±0,01	0,38±0,03			0,34±0,03	0,15±0,01	1,12
Hors-pointe, tête	0,07±0,01	0,16±0,02	0,36±0,04			0,34±0,04	0,14±0,03	1,06
Hors-pointe, queue	0,08±0,01	0,17±0,008	0,33±0,04			0,30±0,04	0,17±0,03	1,10
MR73-1b								
Pointe, tête	0,07±0,008	0,16±0,02	0,39±0,03			0,36±0,03	0,16±0,02	1,08
Pointe, queue	0,07±0,007	0,16±0,01	0,36±0,04			0,34±0,04	0,18±0,04	1,06
Hors-pointe, tête	0,07±0,01	0,16±0,02	0,36±0,04			0,37±0,03	0,16±0,03	0,97
Hors-pointe, queue	0,08±0,02	0,16±0,01	0,33±0,04			0,33±0,03	0,19±0,05	1,0

Annexe A.5: Motrices dues pour un entretien – Ligne 1

Motrice/Condition	a_w (ms^{-2})							SEAT
	x-siège	y-siège	z-siège	x-plancher	y-plancher	z-plancher	x-dossier	
MR63-2a								
Pointe, tête	0,08±0,01		0,49±0,1	0,06±0,01	0,17±0,03	0,42±0,09	0,31±0,07	1,17
Pointe, queue	0,08±0,01	0,17±0,02	0,49±0,09	0,06±0,008	0,15±0,02	0,41±0,09	0,30±0,06	1,20
Hors-pointe, tête	0,09±0,01		0,47±0,08	0,06±0,01	0,17±0,03	0,40±0,07	0,30±0,04	1,18
Hors-pointe, queue	0,08±0,008		0,47±0,09	0,06±0,006	0,16±0,03	0,40±0,08	0,32±0,06	1,18
MR63-2b								
Pointe, tête	0,14±0,01		0,59±0,13	0,06±0,009	0,18±0,02	0,58±0,17	0,31±0,06	1,02
Pointe, queue	0,09±0,02	0,17±0,02	0,58±0,18	0,07±0,01	0,14±0,02	0,56±0,22	0,25±0,06	1,04
Hors-pointe, tête	0,16±0,02		0,69±0,18	0,06±0,009	0,18±0,02	0,61±0,19	0,35±0,09	1,13
Hors-pointe, queue	0,09±0,01	0,18±0,02	0,61±0,17	0,07±0,009	0,15±0,02	0,59±0,20	0,25±0,07	1,03
MR73-2a								
Pointe, tête	0,11±0,02	0,22±0,04	0,48±0,06	0,09±0,03	0,19±0,03	0,43±0,05	0,22±0,03	1,12
Pointe, queue	0,08±0,01	0,21±0,03	0,42±0,05	0,07±0,01	0,18±0,02	0,40±0,04	0,26±0,07	1,05
Hors-pointe, tête	0,11±0,01	0,21±0,03	0,48±0,06	0,09±0,02	0,19±0,03	0,44±0,06	0,20±0,04	1,09
Hors-pointe, queue	0,08±0,01	0,21±0,03	0,46±0,05	0,06±0,01	0,18±0,02	0,43±0,04	0,28±0,06	1,07
MR73-2b								
Pointe, tête	0,09±0,01	0,19±0,03	0,44±0,04	0,08±0,02	0,18±0,03	0,41±0,03	0,17±0,02	1,07
Pointe, queue	0,08±0,01	0,18±0,03	0,40±0,04	0,08±0,01	0,16±0,02	0,38±0,03	0,17±0,02	1,05
Hors-pointe, tête	0,09±0,01	0,20±0,04	0,44±0,04	0,08±0,01	0,19±0,03	0,42±0,04	0,17±0,02	1,05
Hors-pointe, queue	0,08±0,008	0,20±0,02	0,42±0,04	0,07±0,008	0,17±0,02	0,40±0,03	0,17±0,02	1,05

Annexe A.6: Motrices dues pour un entretien – Ligne 2

Motrice/Condition	a_w (ms^{-2})							SEAT
	x-siège	y-siège	z-siège	x-plancher	y-plancher	z-plancher	x-dossier	
MR63-2a								
Pointe, tête	0,09±0,01		0,44±0,07			0,39±0,07	0,37±0,05	1,13
Pointe, queue	0,09±0,01	0,17±0,02	0,42±0,07			0,38±0,07	0,30±0,05	1,10
Hors-pointe, tête	0,10±0,02	0,18±0,02	0,42±0,06			0,38±0,06	0,29±0,04	1,10
Hors-pointe, queue	0,09±0,01	0,17±0,02	0,42±0,06			0,37±0,06	0,24±0,03	1,14
MR63-2b								
Pointe, tête	0,12±0,02	0,19±0,02	0,63±0,16			0,54±0,15	0,42±0,11	1,17
Pointe, queue	0,08±0,02		0,58±0,12			0,53±0,13	0,40±0,07	1,09
Hors-pointe, tête	0,09±0,02		0,56±0,14			0,53±0,13	0,36±0,07	1,06
Hors-pointe, queue	0,08±0,02	0,17±0,02	0,57±0,14			0,48±0,14	0,40±0,07	1,19
MR73-2a								
Pointe, tête	0,09±0,01	0,19±0,03	0,46±0,06			0,42±0,05	0,19±0,03	1,10
Pointe, queue	0,07±0,009	0,18±0,02	0,43±0,06			0,41±0,05	0,18±0,03	1,05
Hors-pointe, tête	0,09±0,01	0,18±0,03	0,49±0,08			0,43±0,06	0,22±0,05	1,14
Hors-pointe, queue	0,08±0,01	0,19±0,02	0,44±0,08			0,41±0,06	0,20±0,04	1,07
MR73-2b								
Pointe, tête	0,10±0,01	0,19±0,03	0,45±0,04			0,41±0,03	0,20±0,03	1,10
Pointe, queue	0,08±0,01	0,18±0,02	0,41±0,06			0,39±0,06	0,19±0,02	1,05
Hors-pointe, tête	0,08±0,01	0,18±0,02	0,42±0,05			0,40±0,04	0,17±0,02	1,05
Hors-pointe, queue	0,08±0,01	0,18±0,03	0,40±0,05			0,38±0,05	0,17±0,02	1,05

Annexe A.7: Motrices dues pour un entretien – Ligne 4

Motrice/Condition	a_w (ms^{-2})							SEAT
	x-siège	y-siège	z-siège	x-plancher	y-plancher	z-plancher	x-dossier	
MR63-2a								
Pointe, tête	0,11±0,02	0,20±0,02	0,58±0,06	0,07±0,01	0,20±0,03	0,54±0,08	0,34±0,03	1,07
Pointe, queue	0,11±0,006	0,17±0,01	0,48±0,01	0,06±0,003	0,14±0,01	0,44±0,01	0,44±0,004	1,09
Hors-pointe, tête	0,10±0,003	0,20±0,02	0,54±0,12	0,08±0,01	0,19±0,03	0,48±0,12	0,37±0,05	1,12
Hors-pointe, queue	0,11±0,02		0,53±0,01	0,09±0,01	0,15±0,01	0,50±0,02	0,46±0,03	1,06
MR63-2b								
Pointe, tête	0,13±0,006		0,68±0,20	0,09±0,005	0,19±0,03	0,80±0,28	0,37±0,06	0,85
Pointe, queue	0,12±0,009	0,19±0,02	0,70±0,12	0,09±0,002	0,15±0,02	0,73±0,19	0,42±0,09	0,96
Hors-pointe, tête	0,10±0,006		0,79±0,11	0,07±0,007	0,19±0,02	0,74±0,10	0,38±0,02	1,07
Hors-pointe, queue	0,11±0,02	0,19±0,02	0,56±0,06	0,09±0,02	0,15±0,02	0,53±0,06	0,40±0,03	1,06
MR73-2a								
Pointe, tête	0,08±0,01	0,21±0,03	0,57±0,04	0,08±0,02	0,19±0,03	0,53±0,03	0,20±0,007	1,08
Pointe, queue	0,09±0,001	0,22±0,02	0,51±0,03	0,09±0,003	0,18±0,02	0,50±0,02	0,21±0,005	1,02
Hors-pointe, tête	0,09±0,009	0,22±0,03	0,55±0,08	0,08±0,002	0,20±0,04	0,52±0,09	0,22±0,03	1,06
Hors-pointe, queue	0,10±0,02	0,25±0,04	0,50±0,02	0,09±0,01	0,18±0,02	0,50±0,03	0,23±0,04	1,0
MR73-2b								
Pointe, tête	0,09±0,001	0,20±0,03	0,52±0,02	0,08±0,003	0,19±0,03	0,49±0,01	0,17±0,009	1,06
Pointe, queue	0,09±0,01	0,19±0,02	0,50±0,04	0,08±0,003	0,17±0,01	0,48±0,04	0,20±0,02	1,04
Hors-pointe, tête	0,08±0,004	0,20±0,03	0,47±0,04	0,08±0,009	0,19±0,04	0,44±0,04	0,16±0,02	1,07
Hors-pointe, queue	0,09±0,009	0,18±0,02	0,49±0,02	0,09±0,007	0,16±0,02	0,47±0,02	0,19±0,02	1,04

Annexe A.8: Motrices dues pour un entretien – Ligne 5

Motrice/Condition	a_w (ms^{-2})							SEAT
	x-siège	y-siège	z-siège	x-plancher	y-plancher	z-plancher	x-dossier	
MR63-2a								
Pointe, tête	0,09±0,01	0,16±0,02	0,38±0,06			0,34±0,06	0,30±0,06	1,12
Pointe, queue	0,11±0,02	0,16±0,01	0,48±0,10			0,42±0,11	0,35±0,06	1,14
Hors-pointe, tête	0,08±0,01	0,16±0,02	0,37±0,04			0,34±0,04	0,30±0,06	1,09
Hors-pointe, queue	0,08±0,01	0,15±0,02	0,40±0,08			0,33±0,07	0,30±0,07	1,21
MR63-2b								
Pointe, tête	0,08±0,007	0,17±0,02	0,47±0,06			0,45±0,08	0,27±0,04	1,04
Pointe, queue	0,10±0,01	0,16±0,01	0,62±0,23			0,65±0,28	0,30±0,06	0,95
Hors-pointe, tête	0,09±0,01	0,16±0,02	0,53±0,11			0,52±0,15	0,29±0,04	1,02
Hors-pointe, queue	0,08±0,01	0,14±0,01	0,48±0,14			0,47±0,15	0,33±0,08	1,02
MR73-2a								
Pointe, tête	0,08±0,01	0,16±0,02	0,40±0,05			0,38±0,04	0,18±0,02	1,05
Pointe, queue	0,09±0,02	0,17±0,02	0,40±0,05			0,37±0,04	0,21±0,03	1,08
Hors-pointe, tête	0,08±0,02	0,17±0,02	0,41±0,07			0,39±0,06	0,18±0,03	1,05
Hors-pointe, queue	0,08±0,01	0,19±0,02	0,36±0,03			0,34±0,04	0,19±0,05	1,06
MR73-2b								
Pointe, tête	0,08±0,007	0,17±0,02	0,38±0,04			0,36±0,04	0,18±0,02	1,06
Pointe, queue	0,08±0,008	0,18±0,02	0,40±0,05			0,36±0,04	0,18±0,03	1,1
Hors-pointe, tête	0,08±0,02	0,17±0,02	0,38±0,03			0,36±0,03	0,16±0,02	1,06
Hors-pointe, queue	0,08±0,01	0,17±0,02	0,40±0,06			0,36±0,05	0,22±0,05	1,11